This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

HARVARD COLLEGE LIBRARY

BOUGHT FROM THE INCOME OF THE FUND
BEQUEATHED BY
PETER PAUL FRANCIS DEGRAND
(1787-1855)
OF BOSTON

FOR FRENCH WORKS AND PERIODICALS ON THE EXACT SCIENCES
AND ON CHEMISTRY, ASTRONOMY AND OTHER SCIENCES
APPLIED TO THE ARTS AND TO NAVIGATION

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DE PHYSIQUE

ANNÉE 1905.

TOURS. — IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES.

BULLETIN DES SÉANCES

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE,

RECONNUE COMME ÉTABLISSEMENT D'UTILITÉ PUBLIQUE

PAR DÉCRET DU 15 JANVIER 1881.

ANNÉE 1905.

PARIS,

AU SIÈGE DE LA SOCIÉTÉ,

44, RUE DE RENNES, 44.

1905

Sci 1080.40.8

HARVARD COLLEGE
MAR 12 1921
LIBRARY

Lapham fund

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE.

Calorimètre Bunsen modifié pour des expériences de cours ;

Par M. V. Cremieu [1].

Les cours de thermodynamique sont, en général, illustrés par un très petit nombre d'expériences.

Ceci tient en grande partie à la difficulté qu'on a à rendre visibles, pour un public nombreux, les phénomènes qui servent à manifester la production ou l'absorption de chaleur ; les calorimètres sont en effet des appareils dont les parties indicatrices sont difficiles à projeter.

Le plus commode des calorimètres est, à ce point de vue, celui de Bunsen. L'adjonction, imaginée par M. Villars, d'un réservoir de mercure M′ qui, par l'intermédiaire du robinet R′ (*fig.* 1), permet de régler très facilement la position de l'extrémité de la colonne indicatrice de mercure, rend cet appareil très maniable.

Cependant il présente encore deux inconvénients : les enveloppes protectrices dont il faut l'entourer pour assurer une protection thermique efficace du manchon de glace sont très encombrantes. D'autre part, il est assez difficile d'obtenir une projection bien nette de la colonne capillaire du mercure indicateur.

De plus, la grandeur des déplacements est déformée par l'effet des lentilles de projection, de sorte qu'on ne peut se servir des déplacements mesurés sur la projection pour faire au cours des mesures, même grossières. Enfin la longueur du tube capillaire projetable est forcément très restreinte.

---

[1] Séance du 6 janvier 1905.

On peut remédier à ces inconvénients.

En premier lieu il est commode de substituer aux enveloppes protectrices habituelles un manchon de Dewar. On obtient ainsi, sous un très faible volume, une protection bien supérieure, permettant par exemple de conserver le manchon de glace utilisable pendant trois jours.

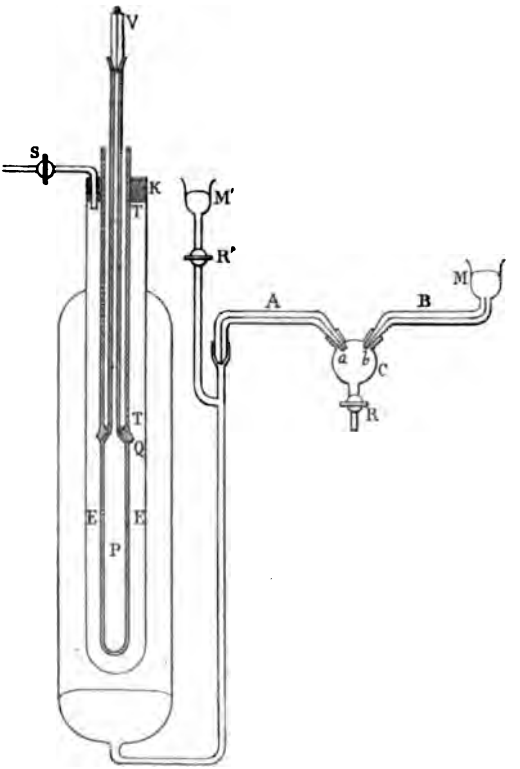


Fig. 1.

En second lieu, pour rendre la projection facile, j'ai imaginé le dispositif suivant : Le tube capillaire indicateur est séparé en deux parties A, B (*fig.* 1), rodées près de leurs extrémités *a* et *b*. Ces rodages viennent se fixer dans des ajutages pratiqués sur la périphérie d'une cuve à faces parallèles C, munie d'un robinet inférieur R. Enfin, la partie B du tube capillaire est terminée par un réservoir à mercure M.

On voit que, si on remplit C d'eau, on a ainsi interposé sur le trajet du mercure indicateur un liquide transparent, incompressible. Par suite, toute variation thermique dans le moufle du calorimètre s'accompagnera d'une chute de gouttes de mercure en *a* ou en *b*.

Le robinet R permet de régler la position de l'extrémité de la colonne de mercure dans le tube B.

La projection des extrémités *a* et *b* s'obtient très facilement à travers les faces parallèles de C; on peut, sur cette projection, compter les gouttes qui tombent, et par suite faire des mesures aussi prolongées qu'on le désire.

Il suffit d'étalonner une fois pour toutes le calorimètre en gouttes de mercure par calorie introduite dans le moufle. Pour des mesures grossières on peut admettre, sans erreur trop grande, que les gouttes ont toujours sensiblement le même poids.

Le réglage avec les robinets R et R′ se réduit d'ailleurs à amener les ménisques de mercure à affleurer aux extrémités *a* et *b*. Pour que les ménisques restent dans cette position, il faut, pour des raisons de capillarité bien connues, que l'orifice capillaire aille en s'évasant légèrement depuis 1 ou 2 centimètres jusque vers l'extrémité.

Application à la mesure de l'équivalent mécanique de la chaleur. — Avec le calorimètre ainsi modifié, on peut assez facilement mesurer J dans un cours.

Il suffit en effet de produire dans le moufle du calorimètre, pendant un temps connu, un travail mesurable quelconque et de compter le nombre de gouttes qui tombent pendant le même temps.

On peut, par exemple, employer un dispositif analogue à celui de M. Miculescu. On sait que ce savant faisait tourner dans l'eau des palettes fixées sur l'axe de l'induit d'un moteur électrique. Il mesurait le travail en équilibrant avec des poids le couple qui tendait à entraîner en sens inverse de l'induit l'inducteur de son moteur monté sur deux couteaux de balance. Le travail est alors égal au produit du couple par $2\pi n$, n étant le nombre de tours du moteur.

Pour réaliser cette mesure, et rendre facilement projetable un déplacement proportionnel au travail, il est commode de fixer le moteur électrique, de petites dimensions, dans un cadre métallique assez grand pour que le calorimètre, avec son enveloppe, puisse le traverser.

Ce cadre est supporté par un fil d'acier ; un second fil vient se

fixer à la partie inférieure, pour éviter les ballottements. On fixe le moteur au cadre de façon que l'axe de l'induit soit vertical et coïncide avec l'axe d'oscillation du cadre.

Dans ces conditions, il est facile de faire tourner sans choc dans la moufle du calorimètre des palettes fixées sur le prolongement de l'axe de l'induit.

La mesure du travail se fera en comptant le nombre de tours, d'une part; d'autre part, en mesurant l'angle dont tourne le cadre quand l'induit est en mouvement. On détermine par une mesure préalable le couple de torsion des fils de suspension. Au cours on projette, à une distance connue, l'image d'une fente lumineuse réfléchie par un miroir fixé au cadre.

La mesure de S se ramène donc, en public, à deux projections très faciles à faire.

On remarquera, en passant, que ce dispositif pourrait servir, avec quelques petits perfectionnements, à trouver une très bonne valeur de J.

En effet, l'incertitude dans les mesures de J porte toujours sur la mesure de la quantité de chaleur, par suite surtout des corrections qu'on doit faire subir à cette mesure.

Or ici, comme dans le dispositif de M. Miculescu, on peut établir un état de régime, ce qui diminue les corrections. Mais, de plus, il est facile de ramener la mesure de la quantité de chaleur à une pesée. On peut en effet, en supprimant la cuve C et le tube B, faire plonger l'extrémité *a* dans une capsule de mesure, préalablement tarée, et peser ce qui est absorbé pendant un temps donné, par suite de la rotation des palettes.

L'étalonnage en poids de mercure du calorimètre est aussi susceptible d'une haute précision, et pourrait s'obtenir de plusieurs façons différentes. J'ajouterai que, pour l'appareil avec lequel j'ai opéré, on obtient une absorption de $14^{mgr},5$ de mercure pour une petite calorie; c'est une grandeur mesurable à plus de $1/100^e$. D'autre part, avec un moteur de 1/30 de cheval-vapeur, entraînant trois palettes d'une hauteur totale de 6 centimètres, on a, pour une vitesse de 35 à 40 tours par seconde, une absorption de 90 milligrammes environ par minute.

Enfin, pour la quantité de travail fourni, le mercure se ramène à une mesure préalable de couple de torsion et à des lectures d'angles, toutes données susceptibles d'une très haute précision.

Application à l'expérience de Joule sur la détente des gaz dans le

vide. — Le calorimètre de Bunsen peut encore servir à reproduire publiquement, et d'une manière très probante, l'expérience de la détente des gaz dans le vide.

Un réservoir P en verre épais, prolongé par une tige à l'extrémité de laquelle on mastique une valve de pneumatique V, s'engage en Q, par un rodage à l'émeri, dans un tube en verre TT. Ce tube passe dans un bouchon qui ferme en K la moufle du calorimètre. Un second trou, pratiqué dans le bouchon, laisse passer un robinet S. En Q se trouvent deux petits orifices, l'un pratiqué dans la paroi de P, l'autre dans le tube T, de façon qu'on puisse isoler ou faire communiquer P avec l'espace laissé libre autour de lui dans la moufle.

Pour faire l'expérience, on ferme l'orifice en Q. On comprime de l'air en P, à 4 ou 5 atmosphères; et, d'autre part, on fait, par S, le vide dans la partie libre de la moufle E. Lorsque l'appareil a repris un zéro stable, on tourne le réservoir de façon à faire communiquer P avec E. L'air de P se détend dans le vide de 5 à 2 atmosphères environ; sur la projection, on ne voit aucun mouvement de mercure.

On ouvre alors le robinet S sur l'extérieur. L'air se détend de 2 à 1 atmosphère, et le refroidissement qui en résulte, parfaitement visible sur la projection, permet de contrôler l'expérience principale précédente.

Notes sur le générateur autocompresseur d'oxygène et sur le chalumeau à lumière oxyacétylénique;

Par M. d'Arsonval [1].

Nouveau procédé de fabrication de l'oxygène comprimé. — Dans ce procédé, combiné à la Société Française de l'Acétylène dissous, l'oxygène se trouve produit par la combustion d'agglomérés se faisant dans l'intérieur d'un réservoir étanche; l'oxygène se comprime de lui-même au moment de sa production. Ces agglomérés se composent d'un mélange de chlorate de potasse avec une

---

[1] Séance du 6 janvier 1905.

substance inerte et une proportion très faible d'un corps combustible, la chaleur dégagée par ce corps en brûlant étant suffisante pour décomposer complètement tout le chlorate de potasse. La

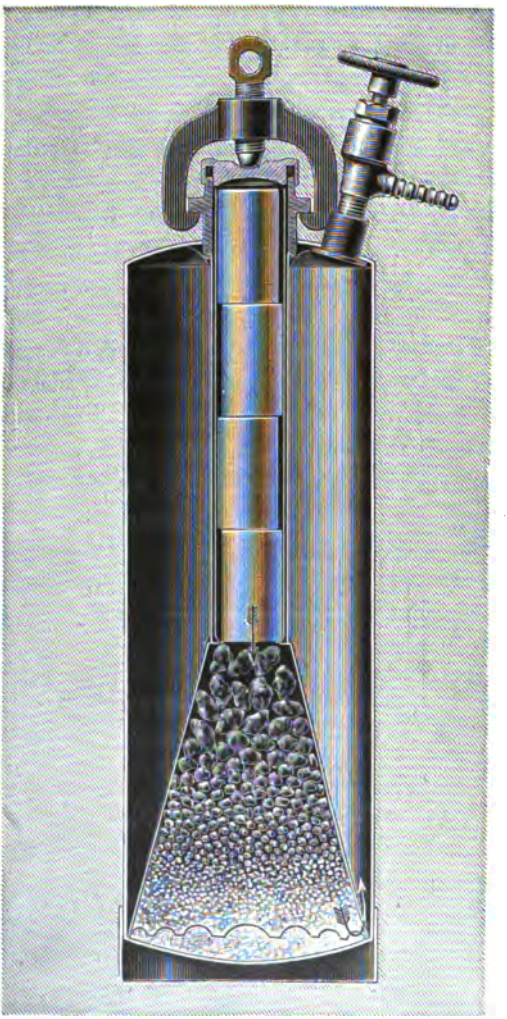


Fig. 1.

matière inerte sert de support à la masse du chlorate en décomposition.

Ces agglomérés se présentent sous la forme de petits cylindres de 30 millimètres de diamètre et 55 millimètres de longueur ; ils dégagent 18 litres environ d'oxygène, et leur combustion dure deux minutes.

L'appareil servant à brûler ces agglomérés est désigné sous le nom de générateur autocompresseur d'oxygène ; il se compose d'un corps cylindrique en acier soudé, suivant les procédés de soudure autogène de la Compagnie Française de l'Acétylène dissous ; au centre se trouve un tube destiné à recevoir les agglomérés et qui se termine par une tubulure sur laquelle se monte un couvercle serré par un étrier pour assurer l'étanchéité ; à côté de cette tubulure se trouve le robinet servant à la prise du gaz.

Pour charger l'appareil, il suffit de mettre le nombre d'agglomérés nécessaire dans le tube perforé qui accompagne l'appareil, d'allumer celui du bas au moyen d'une bougie ou d'un bec de gaz ; une fois en combustion, introduire le tube perforé dans l'appareil et refermer celui-ci en serrant bien l'étrier. La combustion se propage dans l'intérieur, et l'oxygène dégagé se comprime dans le cylindre à mesure qu'il se produit ; la pression peut atteindre 20 atmosphères si l'on a mis la charge complète d'agglomérés.

Une fois tout l'oxygène consommé, défaire l'étrier, retirer le tube perforé, faire tomber les agglomérés brûlés en secouant le tube, et l'appareil est de nouveau prêt à être rechargé.

Ces appareils se font en plusieurs grandeurs, le numéro 1 contenant 4 agglomérés, le numéro 2 en contenant 8 et le type industriel permettant de faire 2 mètres cubes d'oxygène à l'heure.

Lumière oxyacétylénique. — La haute température produite par le chalumeau oxyacétylénique avait de suite fait penser à l'utiliser à la production de la lumière par incandescence ; mais on fut vite arrêté par la fusibilité des matières habituellement employées dans ce genre d'éclairage. La chaux, la magnésie, sont creusées en quelques minutes par le jet du chalumeau ; on essaya d'obvier à cet inconvénient en animant le bâton de chaux d'un mouvement de rotation ; mais, outre la complication du chalumeau, la solution cherchée n'était pas atteinte, car sous l'influence de la chaleur la chaux se fend, et, lorsque le jet de flamme tombe dans cette fente, l'intensité lumineuse varie considérablement ; les impuretés contenues dans la chaux agissent de la même manière.

La vraie solution était donc de trouver une matière résistant à cette

haute température, en mélangeant certaines terres rares et leur faisant subir un traitement particulier ; la Compagnie Française de l'Acétylène dissous a obtenu cette matière. Moulée sous forme de pastilles de 15 millimètres de diamètre et 5 à 6 millimètres d'épaisseur, elle permet, avec un chalumeau consommant 50 litres d'acétylène à l'heure, d'obtenir une intensité lumineuse d'environ 1500 bougies.

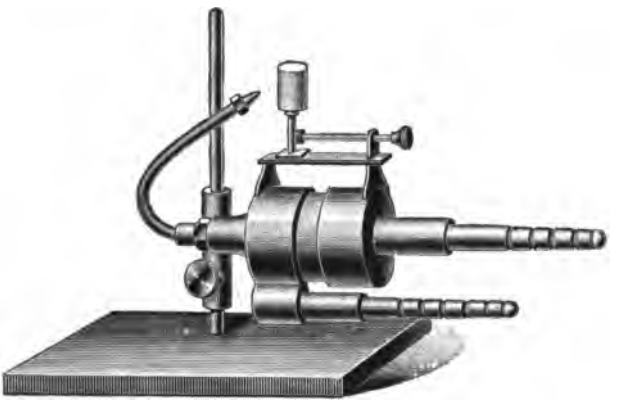


Fig. 2.

Pour mettre en fonctionnement le chalumeau, allumer d'abord l'acétylène en ayant soin de reculer la pastille pour ne pas la noircir, ouvrir ensuite l'oxygène de façon à faire disparaître la flamme blanche de l'acétylène, approcher la pastille à 2 ou 3 millimètres du bec du chalumeau ; à ce moment la flamme qui déborde la pastille doit être incolore ; si elle est colorée, c'est qu'il y a insuffisance d'oxygène.

Ce chalumeau a déjà reçu de nombreuses applications pour la projection cinématographique, pour la télégraphie optique, pour l'éclairage de chantiers, etc.

Nouveaux brûleurs de laboratoire
et leur application au chauffage à température élevée ;

Par M. G. Meker [1].

Ces nouveaux brûleurs, ordinairement employés avec le gaz d'éclairage, présentent quelques particularités qui font que leur emploi permet l'obtention de résultats notablement supérieurs à ceux obtenus avec les brûleurs ordinaires.

Ils tendent vers la réalisation du principe consistant à brûler aussi complètement que possible une quantité de combustible maxima dans un volume de flamme minimum.

Les nouveaux modèles de brûleurs sont de deux sortes :

1° Ceux utilisant simplement le gaz fourni par les canalisations ;

2° Ceux utilisant le gaz et l'air comprimé, ces derniers appareils étant destinés à des cas spéciaux et plus spécialement à l'obtention de températures élevées à l'intérieur de fours.

Les appareils utilisant seulement le gaz se composent (*fig.* 1) d'une arrivée de gaz, lequel s'échappe par l'orifice calibré de l'injecteur I. Sur cet injecteur se visse une cheminée percée de trous à sa partie inférieure, et fermée à sa partie supérieure par une pièce C, caractéristique du système.

Les formes et dimensions des diverses parties de ce brûleur ont été déterminées expérimentalement de façon à obtenir un appareil de maniement simple. La grande section donnée aux trous d'entrée d'air est nécessaire pour arriver à incorporer au gaz la quantité d'air suffisante pour obtenir la combustion complète des produits hydrocarbonés, sans qu'il soit besoin de recourir à une nouvelle quantité d'air extérieur. En fait, pour obtenir le maximum d'effet calorifique, cette combustion ne doit pas être tout à fait totale au sein même de la flamme, qui doit être légèrement réductrice (pour des corps tels que l'oxyde de cuivre).

La forme tronconique de la partie supérieure de la cheminée est telle que les jets de gaz et d'air qui y arrivent puissent, en se détendant, s'y mélanger complètement.

---

[1] Séance du 6 janvier 1905.

La bague de réglage d'entrée de l'air habituellement placée sur les brûleurs est supprimée, ce qui n'empêche pas d'employer ces brûleurs à consommation beaucoup inférieure à leur consommation normale, la flamme restant parfaitement bleue et homogène, et même de les faire brûler presque en veilleuses.

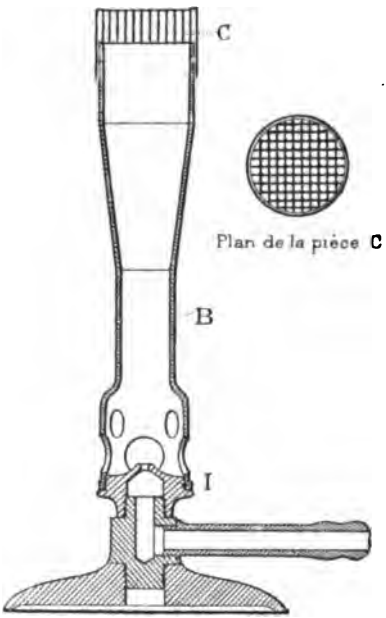


Fig. 1.

La pièce C est basée sur le fait qu'une flamme aura d'autant plus de difficulté à se propager en sens inverse du courant gazeux, qui lui donne naissance, qu'elle rencontrera sur ce parcours en sens inverse une surface refroidissante plus grande. C'est un système cellulaire comparable à un nid d'abeilles dont les cellules seraient de section carrée. Il permet d'avoir des orifices de très grande section, ce qui donne un rapport des pleins aux vides aussi faible que possible, et réduit à son minimum la perte de vitesse du mélange gazeux. En outre, par son passage à travers les cellules, le mélange gazeux est notablement réchauffé, le système agissant alors comme récupérateur de chaleur.

Pour les applications au chauffage courant, chacun des canaux ou

cellules de ce système a environ 2 millimètres de côté et 10 millimètres de hauteur, l'épaisseur des séparations étant de 5/10e de millimètre ; le tout est en nickel.

Fig. 2.

La flamme obtenue (*fig.* 2) avec ces appareils est essentiellement différente de celle des brûleurs Bunsen ordinaires ; le grand cône

bleu est disparu et remplacé par une série de très petites flammes d'un bleu très vif correspondant chacune à une des cellules du système ; ces petites flammes ont à peine 2 millimètres de hauteur ; immédiatement au-dessus, la flamme est homogène et bleu violacé ; un couple thermo-électrique indique en tous les points d'une même tranche horizontale une température régulière ; dans le sens de la hauteur, on constate une décroissance lente de la température au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la base de la flamme.

La constitution même de la flamme fait que, pour obtenir le maximum d'effet, les objets à y chauffer doivent être placés immédiatement au-dessus des petites flammes bleues, soit à 7 ou 8 millimètres du cloisonnage.

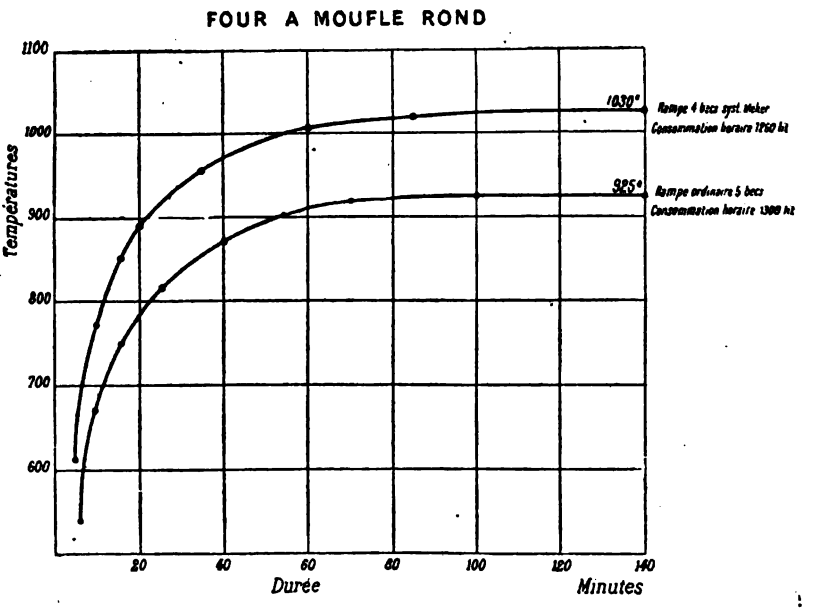


Fig. 3.

Ces brûleurs permettent d'obtenir des résultats intéressants dont voici quelques-uns.

Le brûleur dit n° 3, donnant une flamme de 30 millimètres de diamètre et consommant 330 à 340 litres de gaz à l'heure, à la pression moyenne de 50 millimètres, permet de chauffer un creuset de platine de dimensions courantes (35 millimètres de diamètre) à une tempé-

rature de 1050 à 1080°, c'est-à-dire à la limite que l'on puisse obtenir avec un chalumeau ordinaire consommant de 6 à 700 litres de gaz à l'heure.

Le même bec utilisé dans un four simple destiné à empêcher le rayonnement direct permet d'obtenir la fusion de l'or (1065°) et du cuivre (1080°) dans des creusets en terre ou en porcelaine.

Sous forme de rampe, ce modèle de brûleur permet, à consommation horaire de gaz moindre ou égale, l'obtention d'une température très notablement supérieure à celle obtenue habituellement dans les fours. Ainsi la *fig.* 4 montre que l'on gagne 125° dans la moufle inférieure d'un four Aubin, et montre qu'en outre la vitesse de chauffage est de beaucoup augmentée sans que la consommation de gaz soit supérieure.

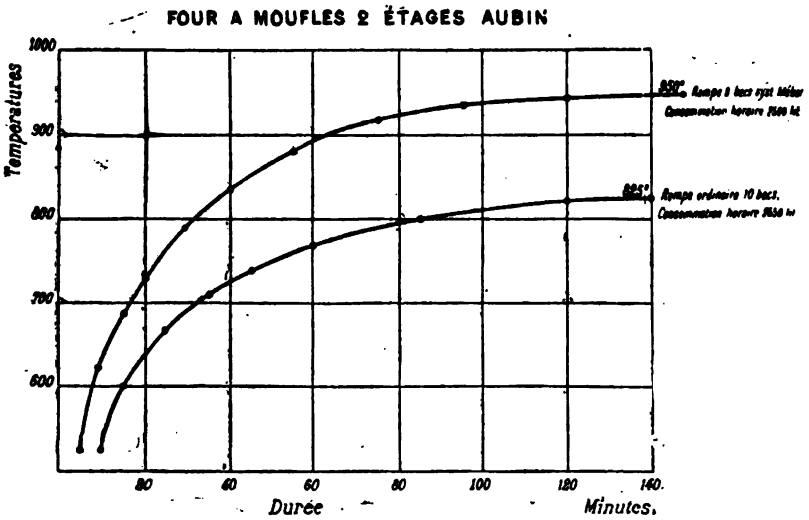


Fig. 4.

Ces modèles de brûleurs permettent le travail du verre. Sous forme de brûleur à sodium, ce brûleur fournit une flamme très riche en rayons jaunes, avec laquelle la sensibilité est augmentée. Il rend aussi des services pour l'examen des spectres de flammes.

L'application de ce système à l'éclairage donne aussi d'excellents résultats.

L'air comprimé, employé de telle façon que le mélange d'air et de

gaz soit complètement effectué avant son inflammation, permet d'obtenir des températures très élevées.

Le brûleur à air comprimé ne diffère du brûleur ordinaire que par la base de la cheminée. Comme l'indique le dessin (*fig.* 5), l'air comprimé est distribué par les orifices sous forme de jets séparés à la base du brûleur, le mélange d'air et de gaz se faisant alors dans la chambre E. Une bague de réglage permet d'admettre par les orifices *c* une quantité d'air secondaire suffisante pour obtenir le maximum d'effet; la flamme correspondant à ce maximum est analogue, à la vitesse près, à celle des brûleurs précédents.

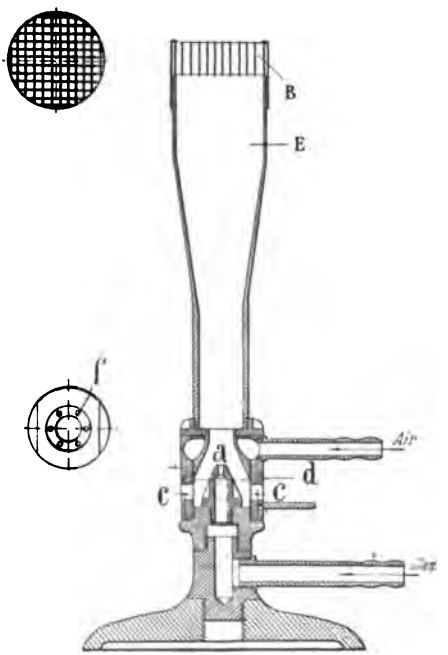


Fig. 5.

Les résultats obtenus avec ces types de brûleurs diffèrent suivant la pression de l'air fourni au système, l'augmentation de cette pression permettant une augmentation de consommation de gaz dans le même volume de flamme, donc une vitesse et une température plus élevées.

Avec de l'air comprimé à 90 ou 100 grammes par centimètre carré,

le brûleur n° 3 permet de chauffer le contenu d'un creuset en platine de dimensions courantes entre 1250 et 1300°.

Alimenté avec de l'air comprimé à $1^{kg},5$ par centimètre carré, on arrive, avec le brûleur n° 2, à la fusion en dix à quinze minutes de masses de platine supérieures à 50 grammes placées dans un four à chaux.

Dans un four approprié et construit spécialement dans le but d'éviter le rayonnement, on obtient, avec le brûleur n° 4 de 40 millimètres de diamètre, la fusion du nickel en creusets de 850 centimètres cubes de capacité avec une pression d'air de 90 à 100 grammes, tandis qu'avec une pression de 1,5 à 2 kilogrammes on arrive à des températures supérieures à 1700° et qui n'ont pu encore être déterminées exactement, les matériaux réfractaires habituels étant incapables de résister aux températures obtenues.

Sur la fonction photographique ;

Par M. Adrien Guébhard [1].

Vues générales. — Dès les premières observations faites sur la *fonction photographique*, c'est-à-dire sur l'aptitude de certaines substances à subir, sous certaines influences, de l'ordre des radiations, des modifications visibles de leur surface, il fut remarqué que cette fonction, bien loin d'être régulièrement et indéfiniment croissante, présentait un maximum, au delà duquel elle tendait à retomber à zéro.

La forme précise de la courbe représentative n'a pas encore été sûrement établie, et il est hors de doute qu'elle varie suivant les modalités respectives d'énergie excitatrice ou réceptrice mises en jeu. Mais le fait seul de l'existence d'un changement de signe de la dérivée suffit à faire comprendre comment, lorsqu'une action photographique, d'ailleurs quelconque, se superpose à une autre, quelconque elle-même, elle peut, soit « continuer » celle-ci dans le sens de la croissance, si le maximum n'est pas atteint, soit, en apparence, la « détruire », si le maximum est dépassé, soit, enfin, paraître

---

[1] Séance du 3 février 1905.

indifférente, « neutre », en négatif ou en positif, si elle correspond soit à un plateau maximal, soit au voisinage du minimum suivant.

De même on conçoit que, s'il se juxtapose, sur une même surface, des actions d'intensités très différentes, correspondant, les unes à la période d'ascension, les autres à la chute de la courbe, celles-ci doivent donner des images régressives, « inversées » par rapport aux autres.

Ainsi, sans plus, s'éclaircissent immédiatement tous les faits dits de « continuation », de « destruction », de « renversement », qui, sous les explications les plus extraordinaires et les plus contradictoires, encombrent la littérature des sels d'argent et y font persister un vocabulaire trompeur sous lequel disparaît la claire simplicité d'une loi très générale, applicable à toutes les modalités physiques de la sensibilité de surface, depuis les images de Moser et les *thermographies* de Hunt jusqu'aux rayons X, en passant par la phosphoroscopie (où il serait peut-être temps qu'on la mît en compte), dominant la photographie sous toutes ses formes (action de la lumière sur les résines, le soufre, comme sur les sels métalliques, etc.), pour aboutir peut-être aux modes les plus divers de la sensibilité physiologique, qui, eux aussi, de la surexcitation passent à l'anesthésie.

Malheureusement, suivant que le photographe est ou chimiste ou physicien, ou ni l'un ni l'autre, on le voit attribuer soit à la vertu de tel bain, soit au pouvoir spécifique de telle vibration, soit à une circonstance insignifiante quelconque, le même accident, qu'un autre opérateur, ou parfois le même en une autre occasion, rattache à une raison tout opposée. Aucun, du reste, n'arrive à reproduire identiquement, en se basant exclusivement sur la circonstance donnée comme primordiale, la particularité, soit de « continuation », soit de « destruction » ou de « renversement », dont est loin d'être soupçonnée la connexité, non seulement avec celles dont les noms seuls semblent proclamer l'antagonisme, mais encore avec celles, toutes pareilles, que d'autres ont obtenues.

Aussi est-ce un sentiment véritablement pénible qui se dégage d'une incursion rétrospective dans cette abondante bibliographie spéciale [1], et un soulagement intense quand, sous l'impérieux besoin d'un peu de clarté, apparaît le lien logique de l'unique circonstance

---

[1] Un aperçu s'en retrouve dans la première partie de mon mémoire *Sur l'Inversion* (*Rev. des Sciences photographiques*, I, p. 257-269, 2 pl. ; 1904).

réellement commune à toute cette variété opératoire [1] : la superposition additive de divers modes d'énergie, ou physique, ou chimique, rattachant tous les cas particuliers, sans exception, à la loi fondamentale.

Influence du bain développateur. — Il est vrai que cette loi avait besoin elle-même d'être auparavant complétée, sinon dans ses détails, au moins dans sa généralité. S'il était bien connu, en effet, quoique, peut-être, insuffisamment formulé, que, par son facteur physique (la lumière), la fonction photographique, partie de zéro, revenait vers zéro, en passant par un maximum, rien de général, et pas grand'chose de particulier, n'était connu relativement à l'intervention du second facteur, souvent principal : le bain dit *révélateur* ou *développateur*.

Tout au plus les praticiens savaient-ils qu'en prolongeant la durée ou exagérant l'intensité de son action, l'on arrivait parfois à diminuer au lieu d'augmenter les noirs du cliché. Même, s'il s'agissait, sur gélatino-bromure, de valeurs d'impression très grandes, qui, fixées avant révélation, eussent donné un négatif direct, le bain, très vite, retournait celui-ci en positif, donnant, aux points les plus éclairés, des transparences parfois toutes pures.

Des observations méticuleuses avaient bien constaté que cette chute des noirs n'était pas directe, ni semblable pour tous, mais précédée d'une ascension, d'autant plus longue que l'impression avait été moins grande. Enfin l'on savait aussi qu'il n'y a pas de surface sensible, si peu impressionnée qu'elle soit, qui ne finisse par noircir dans un bain suffisamment fort ou suffisamment prolongé ; d'où le fatal *état neutre* de développement, voile de deuil du cliché.

Moins connu était ce fait, que l'adjonction, même à très faible dose, de certains renforçateurs dans le bain, une goutte de nitrate d'argent, d'hyposulfite de soude, etc., pouvait produire presque

---

[1] Ce qui fait la difficulté du problème photographique, c'est la multiplicité des variables qui s'y mêlent. Aussi la première règle expérimentale devrait-elle être de réduire au rôle de constantes fixes et connues toutes celles dont on ne veut pas étudier la variation. Comment prétendre découvrir « les actions chimiques de la lumière » si on laisse aux actions physiques toute leur incertitude ? Pour préciser celles-ci, mon principal souci fut d'éliminer les autres et spécialement de rendre constante et comparable l'action du bain, par l'usage du développement lent, qui, tout en réduisant considérablement les chances d'erreur de temps, supprime presque celles de variabilité chimique, si l'on choisit une solution peu altérable, comme : eau 1000, sulfite de soude anhydre 10, métoquinone 1 ; une durée fixe point exagérée : 1 heure ; une température moyenne : 15° ; et si l'on a soin de répartir en positions symétriques les phototypes par demi-douzaines, dans les cuves verticales.

instantanément le même effet d'*inversion* du cliché qu'une exposition supplémentaire, même très courte, à une lumière, même faible, comme celle du verre jaune.

Mais tout à fait inattendue fut la constatation [1] que cette inversion pût être obtenue, même avec un bain très faible, pourvu qu'en fût seulement prolongée assez la durée.

Essayant de synthétiser toutes ces données éparses, et les nouvelles qu'apportait l'inversion par sur-développement, j'arrivai au diagramme suivant (*fig.* 1) qui, sans prétendre à une rigueur numérique,

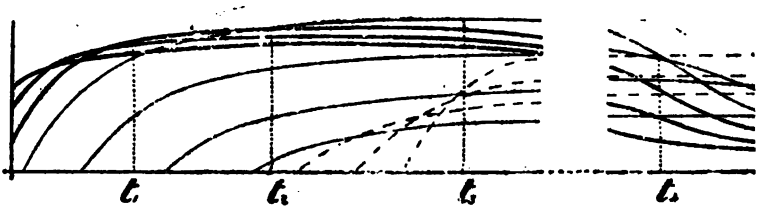


Fig. 1. — Graphique synoptique de la marche du noircissement en fonction de la durée du développement, pour diverses valeurs de l'impression.

impossible à réaliser en l'espèce [2], rendait compte synoptiquement de tous les faits alors à ma connaissance, relativement à l'influence

---

[1] A. Guébhard, *Sur l'inversion de l'image* sous-*posée*, *par* sur-*développement lent* (*Bull. Soc. fr. de Photographie*, 2e série, XIX, p. 64-66; 1903).

[2] La figure que je donnerais aujourd'hui différerait déjà notablement, pour la forme individuelle des courbes vers leurs extrémités, du schéma provisoire que j'avais donné dans mon premier *Essai de représentation de la loi du développement photographique en fonction de la durée* (*C. R. Ac. Sc.*, CXXXVIII, p. 491 ; 22 février 1904). Car la conclusion même de la présente étude, réformant les données de MM. Lumière sur lesquelles j'avais tablé, m'obligerait à modifier l'allure lointaine du faisceau; et, d'autre part, l'utilisation du soleil du Midi m'a porté à croire que j'avais, aux courbes des excitations les plus grandes, attribué les longs plateaux qui appartiennent réellement aux excitations simplement grandes de l'usage courant. Les courbes de la solarisation devraient avoir une ascension et une chute encore plus rapides. Mais, tel qu'il est, ce graphique a suffi, non seulement à représenter certaines circonstances inattendues du développement, mais encore à expliquer des faits nouveaux, tels que le *silhouettage photographique* (*C. R. Ac. Sc.*, CXL, p. 715), jusque dans des détails que, sous le couvert de simples contradictions verbales, on avait prétendu lui soustraire (*C. R. Ac. Sc.*, CXL, p. 785). Aussi me paraît-il préférable d'attendre, pour le rectifier, d'avoir pu multiplier des observations que, malheureusement, l'urgence d'une autre étude qui me retient loin de Paris m'empêche de réaliser, et que mon seul but actuel est de tâcher de provoquer, fût-ce à titre rectificatif, de la part d'autres physiciens, mieux en mesure.

du temps de développement sur le noircissement, pour des valeurs diverses de l'excitation physique.

Or il suffit de le rapprocher de la courbe (*fig.* 2) également schématique, et à peine un peu mieux étayée de trop rares données numériques, qui essaie de symboliser la fonction photographique elle-

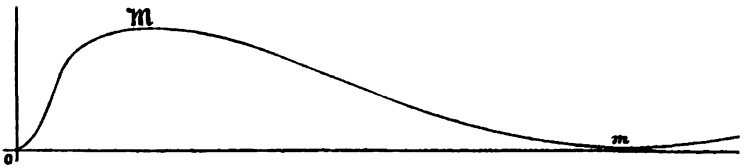


Fig. 2. — Schéma symbolique de la fonction photographique ou des altérations de surfaces en fonction de la somme de leurs causes.

même (1) ; et l'on arrive tout de suite à cette idée, qui, émanée pour moi du rapprochement d'une multitude, en apparence hétéroclite, de faits dépouillés, s'est imposée inéluctablement même aux observateurs les plus éloignés de toute vue générale, amenés à qualifier de « développement » certaines « actions continuatrices » de certaines radiations : à savoir, que s'il y a, pour chaque modalité d'énergie excitatrice, une courbe particulière du noircissement, toutes ces courbes demeurent de même famille, sans qu'il y ait de différence fondamentale entre celles de l'énergie physique, dite excitatrice, et de l'énergie chimique, dite développatrice ou même révélatrice, les unes et les autres ne faisant que s'ajouter, pour donner, chacune avec son coefficient propre, des résultats toujours additifs, uniquement dépendants d'une sommation algébrique et non d'une opposition physique d'énergies (2).

Quelques exemples particuliers vont préciser ces considérations générales.

« *Continuation* ». — Lorsque, sur un phototype impressionné, l'on

(1) Rigoureusement, il faudrait autant de diagrammes divers de faisceaux de courbes qu'il y a de modalités d'énergie soit excitatrice, soit réceptrice.

(2) Pour ne rien omettre, il y aurait lieu de porter en compte, dans la totalisation des énergies coefficientes, celle qu'emportent de l'officine du fabricant les préparations sensibles, dont la présumée constance n'existe même pas entre les divers points d'une même plaque (H. Bouasse). Avec une très grande justesse de vues, qui ne se retrouve pas toujours lorsque l'emporte son rôle de compilateur, Eder assimile l'opération de la *maturation* des émulsions à une sorte de voilage préalable dû à l'action de la chaleur au lieu de la lumière.

fait agir une lumière assez atténuée pour être incapable de vaincre par elle-même l'inertie de départ de la surface sensible, il va de soi que cette action, quelque prolongée qu'on la suppose, laissera intactes toutes les portions du phototype demeurées en deçà de ce seuil, mais « continuera » toutes les parties déjà mises en route, et les poussera chacune soit vers le maximum de sa montée, si elle en était loin, soit au delà, si elle en était proche.

De là les contradictions qui surgirent dès les premières observations faites par Daguerre lui-même, par Claudet, Lerebours, E. Becquerel, etc., et, en dernier lieu, par M. P. Villard [1], sur l'action, dite tantôt *continuatrice* et tantôt *destructrice*, des verres rouges ou jaunes, dont tout le rôle consiste à arrêter les radiations d'activité supérieure au minimum de démarrage, pour laisser uniquement passer, pendant une durée qui compensera leur faiblesse, des rayons auxquels Edmond Becquerel lui-même ne perdit jamais une occasion de dénier la vertu spécifique que semblaient leur attribuer des épithètes dont l'une au moins l'avait eu pour auteur.

Est-il utile d'ajouter — cela a été constaté par tous les observateurs sans parti pris [2] — que toute autre source lumineuse suffisamment atténuée, fût-ce de l'autre extrémité du spectre, peut remplir, à quelques nuances de modalité près, le même rôle, en un temps convenablement proportionné? Si l'on réussit mieux avec l'extrémité la moins actinique, c'est qu'elle est plus facile à rendre inoffensive pour les blancs, lesquels on n'arrive d'ailleurs à faire respecter ensuite par les révélateurs que par un artifice analogue d'atténuation.

M. P. Villard fait très justement remarquer [3] que ce mode de « continuation » n'est pas autre chose qu'un vrai « développement », et cette confirmation de l'assimilation qu'avaient formulée maints autres observateurs constitue un argument important en faveur de

---

(1) *Soc. de Physique*, 2 et 16 décembre 1904.

(2) Biot et Arago eux-mêmes, dans leur rapport sur la première communication d'Edmond Becquerel, disaient que la lumière d'une lampe de Locatelli pouvait, aussi bien que les rayons rouges du soleil, *continuer*, plutôt que détruire, une impression commencée.

(3) P. Villard, *Sur les actions chimiques de la lumière* (*Soc. fr. de Physique*, 2 décembre 1904).— Par contre, on ne saurait admettre l'objection à laquelle se bute cet auteur, comme quoi un agent incapable de commencer à lui seul une action physique ne saurait s'ajouter à un autre pour continuer cette même action une fois commencée. Les exemples physiques qu'on pourrait objecter à cette argumentation sont trop nombreux et trop élémentaires pour qu'il y ait lieu de les spécifier.

l'unification énergétique que nous nous efforçons d'établir entre les deux facteurs concurrents, physique et chimique, se *continuant* simplement l'un l'autre, dans l'acte photographique.

Voilage. — Au lieu de demander *a posteriori* à une lumière atténuée (*Nachbelichtung*) la *continuation* d'une action qu'il est bien plus simple de laisser se *continuer* toute seule, il sembla naturel, dès l'origine de la photographie, de recourir à une légère exposition préliminaire (*Vorbelichtung*) pour vaincre l'obstacle de la première inertie et déduire ainsi, du temps de pose ultérieur, tout celui qu'il faudrait perdre à franchir le seuil de départ. Heureusement celui-ci était assez élevé, à l'époque, pour n'être point trop souvent outrepassé par un élan disproportionné (1).

Mais l'usage s'établit si bien de regarder cette pratique comme un simple complément de la sensibilisation, que nul ne s'avisa jamais de se méfier de l'énorme disproportion de cette intervention préalable (2) de la « lumière diffuse » avec la brève intervention efficace de la lumière diaphragmée et géométrisée, ni surtout de l'énorme indétermination de ce facteur variable, auquel on demandait un instrument présumé constant.

Aussi fut-ce la principale origine de toutes les incohérences d'où est sortie la néfaste logomachie dont il paraît si difficile, encore aujourd'hui, de déblayer le terrain. Que de forces vives ne s'y sont pas perdues! Rien de clair ne sortit jamais de ce fatras de cas innombrables, et nous passerons sans insister sur le détail de faits qu'aucun auteur, autrement que par hasard, ne réussit à répéter identiquement deux fois.

Photographies spectrales. — Un point cependant mérite d'être relevé, à cause de l'importance de ses conclusions devenues presque classiques. C'est celui des photographies spectrales et des comparaisons de sensibilité des surfaces, faites avec la plaque voilée, c'est-à-dire avec un instrument de comparaison non comparable avec

---

(1) Le fait seul que la plaque daguerréotype se manipulait couramment à la lumière d'une flamme de bougie donne la mesure de ce qu'on pouvait se permettre alors impunément, comme voilage, tout en profitant souvent inconsciemment de cette auxiliation méconnue.

(2) Il va de soi que cette opération, pratiquée *pendant* la pose, aboutirait au même résultat. Ce serait un chapitre d'histoire, et non le moins amusant, de l'esprit gratuitement complicateur de certains inventeurs, que d'énumérer les artifices imaginés pour permettre à la chambre noire d'opérer automatiquement, dans ses arcanes, cette *Nebenbelichtung*, si facile à réaliser hors d'elle.

lui-même, altéré toujours, dans une mesure indéterminée, épuisé souvent et totalement amorti ou interverti dans sa sensibilité.

Dans le but louable de faire apparaître les extrémités du spectre qui, presque inactives par elles-mêmes, ont besoin d'un énorme renfort pour arriver à marquer leur impression dans le temps ordinaire de pose (1), on donnait à tous les points de la plaque une première impression, telle qu'à peine le violet y avait-il ajouté la sienne le maximum était, pour lui, atteint, puis dépassé, de sorte que, pendant la lente et pénible ascension des extrémités, sa chute encore se précipitait : d'où, au développement, une apparence de minimum à la place exacte du maximum vrai, et deux apparences de maxima errants, qui s'écartaient avec la prolongation ou de la pose, ou du développement, ou du voilage.

Comment se peut-il qu'en voyant, dans l'espace du prétendu minimum, apparaître, avec le spectre solaire, des raies *en positif* (2), tandis qu'elles restaient négatives dans les deux autres plages, et « amphitypes » entre deux ; et puis qu'en constatant qu'une impression directe, sans voilage, donnait, en pose normale, une image toute contraire, et seulement en pose suffisamment exagérée une image analogue ; et qu'enfin aucune tentative n'arrivait à fixer la position des pseudo-maxima ; comment se fait-il que des esprits aussi élevés que Draper (3), Herschel (4), E. Becquerel (5), etc., au lieu de faire le simple retour indiqué vers la propriété, *déjà connue*, de la courbe fonctionnelle, aient usé tant d'efforts à rechercher, par ce procédé trompeur, les réactions spectrales des surfaces, et à représenter en

---

(1) Ce n'est d'ailleurs qu'affaire de temps, et, sans parler d'une foule d'auteurs récents, tels que H.-W. Vogel (*Phot. Mittheil.*, XV, 47 ; 1878), Abney (*Phot. News*, p. 302 ; 1878), Lüppo-Cramer (*Wiss. Arb. auf dem Geb. d. Phot.*, p. 53, 8°, Halle-a-S. ; 1902), etc., E. Becquerel lui-même insiste fréquemment sur ce que le rouge et l'infra-rouge, en y mettant le temps, montrent la même faculté *excitatrice* que le violet. Même en phosphorescence, l'extinction est toujours précédée d'un instant de surexcitation. Et cependant n'est-ce pas là que des apparences mal scrutées justifieraient le mieux l'emploi du mot *destruction*, tel qu'on essaie aujourd'hui de le remettre en honneur ?

(2) Foucault et Fizeau, *Observations sur l'action des rayons rouges sur la plaque daguerrienne* (*C. R. Ac. Sc.*, XXIII, p. 680 ; 1846).

(3) J.-W. Draper, *On certain spectral appearances and on the discovery of latent light* (*Phil. Mag.*, 3e série, XXI, p. 348 et 453 ; 1842, etc.).

(4) J.-F.-W. Herschel, *On the action of the rays of the solar spectrum on the Daguerréotype plate* (*Phil. Mag.*, 3e série, XXII, p. 120 ; 1843).

(5) Edm. Becquerel, *Des effets produits sur les corps par les rayons solaires* (*Ann. de Physique et Chimie*, 3e série, IX, p. 257-331, Pl. III ; 1843).

de nombreuses planches des données dont eux-mêmes constataient l'instabilité ?

Le seul procédé sûr pour connaître exactement le vrai maximum d'action d'un spectre sur une surface devrait consister, au contraire, à prendre, sur la surface intacte, des impressions échelonnées, soit comme intensité, soit comme durée, et à noter la première apparition d'une tache négative. Avec le voilage, on a un excellent procédé pour étendre l'image aux extrémités ; mais ce n'est qu'en le pratiquant lui-même par échelons qu'il sera permis de tirer quelques déductions des apparences observées, et encore à condition de les savoir renverser où il faut.

Il y aurait, de ce fait, toute une étude à reprendre (1), pour vérifier s'il y a réellement d'une substance à une autre les différences de propriétés actiniques indiquées par les anciens observateurs, ou seulement des différences corrélatives soit de la réponse vibratoire intramoléculaire — ce qui nous rapprocherait singulièrement de toutes les questions qu'a mises à l'ordre du jour le radium, — soit simplement des pouvoirs absorbants — ce qui réduirait définitivement le problème de l'orthochromatisme à celui des spectres d'absorption, et ferait dépendre uniquement des valeurs de λ l'effet de la lumière sur toutes les substances, simplement différenciées les unes des autres par des coefficients numériques de sensibilité.

Solarisation. — Dès que les rayons du soleil atteignent directement la plaque, il suffit d'un temps extrêmement court pour que toute la convexité de la courbe soit parcourue et redescende de son maximum vers le minimum.

Toutes les valeurs, alors, se montrent *inversées*, et le phototype devient positif dans les parties corrélatives : d'où le nom de *solarisation* donné à l'état de la plaque correspondant à la partie descendante de la courbe fonctionnelle.

L'idée devait se présenter de suite, mais c'est en vain qu'on essaya de la rendre pratique, d'obtenir ainsi des *positifs directs*, dits encore

---

(1) Toutes ces considérations s'appliquent *a fortiori* à la phosphoroscopie ; nul doute que la durée d'exposition préalable de la surface sensible n'y joue un rôle aussi important, et aussi injustement négligé, que le *voilage* des expériences précitées. Il est à souhaiter qu'en ôtant à cet important facteur son caractère d'incertitude et en le ramenant strictement au rôle de constante d'expérience, on arrive, avec le procédé des expositions échelonnées, à donner aux très belles recherches d'E. Becquerel la formule synthétique précise qui paraît encore leur faire défaut.

contre-types, ou phototypes inversés en valeurs et non en positions, indispensables pour l'industrie des reproductions à la presse. Effectivement, quels résultats comparables pouvait-on obtenir en s'obstinant à recourir [1], au lieu des sources lumineuses facilement graduables et largement suffisantes des laboratoires, à l'aléatoire « lumière diffuse », dont le moindre nuage qui passe et la moindre fraction de seconde qui s'écoule suffisent à changer du tout au tout les effets?

D'ailleurs un coup d'œil au schéma (*fig.* 1) suffit à faire comprendre comment il n'est jamais possible de retrouver dans l'inversion la gamme véritable des valeurs dans son ordre de proportion et presque impossible d'y retrouver, à la place des plus grands noirs, des blancs purs.

Les au-delà. — D'après des expériences de MM. A. et L. Lumière [2], il semblait même que ce zéro ne pût jamais être atteint et que la courbe photographique (à vrai dire, très inexactement dessinée par eux) dût finir en parallèle à une petite distance de l'axe. Et quoique ces auteurs donnassent dès lors l'explication très simple de l'inversion que je n'ai fait que reproduire, ils mettaient sur le compte des particularités du développement le fait, cité par M. Janssen [3], qu'on obtient, en photographiant, pour des poses croissantes, le Soleil au ciel : 1° l'image négative ordinaire; 2° un premier *état neutre*, la plaque devenant uniformément obscure *sous l'action du révélateur;* 3° une image *positive;* 4° un second *état neutre*, opposé au premier, et où la plaque devient uniformément claire sous l'action du révélateur; 5° une deuxième *image négative*, semblable à l'image ordinaire, mais en différant par les états intermédiaires dont elle est séparée et par l'énorme différence d'intensité lumineuse qui est nécessaire pour l'obtenir; 6° un troisième *état neutre* où l'image négative de deuxième ordre se trouve remplacée par une teinte sombre uniforme.

Les quatre premières phases de Janssen s'expliquaient très bien par la courbe Lumière, pourvu qu'on restreignît le sens d'*état neutre* à l'égalité des deux teintes, seules en jeu. De véritable « état neutre »

---

(1) H. Reeb, *Contre-types par surexposition* (*Bull. Soc. fr. de Photographie*, 2e série, XVIII, p. 431; 1902).

(2) A. et L. Lumière, *les Phénomènes d'inversion de l'image photographique* (*Bull. Soc. fr. de Photographie*, série, IV, p. 209; 1888).

(3) Janssen, *Sur les transformations successives de l'image photographique par la prolongation de l'action lumineuse* (*C. R. Ac. Sc.*, XCI, p. 199; 1880).

il ne saurait y avoir rigoureusement pour plus de deux teintes, quoique pratiquement s'en rencontrent souvent les apparences sous le nom de *voile*. Mais y a-t-il vraiment une *deuxième image négative*, qui ne soit pas, comme le pensaient MM. Lumière, la simple fixation, avant développement (ou avec développement insuffisant), de l'image négative, qui est presque toujours directement observable *à sec*, sur la couche sensible solarisée?

Les expériences de MM. Lumière paraissaient décisives, leur observation admissible, et ce fut en tablant sur cette donnée que je donnai moi-même à tout mon faisceau une allure finale parallèle à l'axe.

Cependant le souvenir me revenait de cas d'inversion où s'étaient montrées, à la place des noirs primitifs, des transparences au moins égales aux plus pures des négatifs ordinaires (1). Première présomption que la courbe fonctionnelle devait repasser au moins tout près du zéro.

D'autre part, je me rappelais avoir vu traîner dans les livres ce fait qu'il suffit d'exposer à l'action directe du soleil une plaque impressionnée pour « effacer » l'impression et régénérer la surface, c'est-à-dire pour la remettre en état, soit de rester blanche au bain, soit de noircir à une exposition nouvelle. A la vérité, si la première alternative me paraissait naturelle, et simplement confirmative d'un zéro prolongé, la seconde, pourtant très nettement affirmée, de la « sensibilité restituée », me laissait sceptique, à la pensée qu'un petit instant d'exposition nouvelle pût produire un noircissement nouveau, alors que ce même instant, en plus ou en moins sur la durée, nullement précisée, de la pose d'« effacement », n'altérait en rien le résultat contraire. Fallait-il donc, à la gélatine, un repos, pour se remettre de la secousse rénovatrice?

Cependant M. P. Villard, tout en déclarant (2) que « personne ne songerait à faire une photographie avec une plaque exposée à la lumière blanche jusqu'à solarisation complète », assurait quelques instants auparavant que, « pour le gélatino-bromure ou gélatino-chlorure d'argent, l'effet *destructeur* (de la lumière jaune, qualifié de

(1) M. P. Villard en projeta un de cette sorte à la séance de la Société de Physique du 2 décembre 1904. Et c'est précisément le désir d'arriver à régulariser ces faits d'heureux hasard, comme il n'est guère de praticien qui n'en ait observé, qui a servi de stimulant aux chercheurs dans cette voie, où cependant personne n'arriva jamais à justifier industriellement l'obtention des prix institués à ce sujet en maints concours.

(2) Séance de la Société française de Physique, 2 décembre 1904.

continuation pour d'autres substances moins sensibles) subsiste seul; après destruction, la plaque a recouvré presque intégralement sa sensibilité ». Puis « la plaque traitée par l'infra-rouge... est restaurée et recouvre sa sensibilité ». Et encore (1) : « La sensibilité est si exactement restaurée qu'une comparaison très précise est nécessaire pour trouver une différence. »

Il est vrai qu'à propos de la première observation, M. P. Villard ajoutait : « L'analogie avec ce qui se passe pour les rayons X est complète. » Or c'est par la lumière *blanche*, et point jaune ou rouge, que M. Villard pratique l'*effacement* des rayons X (2); et il ajoute : « Le bromure ne revient pas complètement à son état initial : il a perdu complètement sa sensibilité. »

Malgré l'inévitable cortège de contradictions de toutes ces données fort imprécises, ne devaient-elles pas, par leur ensemble, et dès qu'on se détachait de la minutie des faits pour s'élever à un point de vue énergétique plus général, créer une présomption en faveur d'un au-delà du zéro de chute et d'une réascension des noirs ?

N'est-ce pas un article de foi pour les praticiens que, si un cliché solarisé n'est pas retiré du bain au moment précis de l'éclaircissement des noirs, ceux-ci *repartent*, pour se confondre tous à la longue dans un voile opaque, le troisième *état neutre* (deuxième *noir*) de M. Janssen ?

Un autre fait, remarqué par M. Stehelin-Scheurer et dont j'avais eu connaissance par la communication manuscrite des notes d'un travail de recherches expérimentales *sur les contre-types photographiques*, présenté à la *Société industrielle de Mulhouse* en 1901, aurait dû depuis longtemps m'éclairer, si une certaine amphibologie des termes de « positif » et « négatif » ne m'avait empêché d'en saisir la portée. Si, disait cet observateur, on est presque sûr (sur plaque Saint-Clair), à partir de deux secondes et jusqu'à cinq minutes d'exposition au soleil, d'obtenir un positif, « il y a, au delà, retour progressif à l'impression normale : pour soixante heures de plein soleil, le négatif est de nouveau franc... »

---

(1) Société française de Physique, 16 décembre 1904.

(2) P. Villard, *Sur l'action chimique des rayons X* (*C. R. Ac. Sc.*, t. CXXVIII, p. 237 1899). — Bien entendu, ce qui semble une contradiction pour lui n'en est pas une pour nous qui ne faisons aucune différence, au point de vue « destructeur », entre les rayons jaunes agissant longtemps et les blancs agissant peu, que ce soit après d'autres rayons lumineux ou des rayons X.

Cette constatation est des plus importantes, car, faite sur des clichés présentant un ensemble de valeurs diverses, quoique non graduées, elle échappait au vice de toutes les expériences basées sur la comparaison de deux valeurs seulement, susceptibles de redonner des états identiquement correspondants sans que rien ait donné l'avertissement d'un changement de signe de la dérivée (1).

J'ai retrouvé une observation analogue de M. C. Bennett (*Brit. Journ. of Phot.*, 1878). Si, au lieu d'exposer une plaque à la chambre noire une seconde, par exemple, pour avoir un négatif, on l'expose une minute, « l'image se renverse au développement. Une exposition plus prolongée redonne un négatif; une plus longue, encore un positif. »

Enfin, dans un des mémoires les plus scientifiquement étudiés sur ces questions fondamentales (2), mais malheureusement presque introuvable, ignoré des meilleurs *Handbücher* allemands, et que je n'arrivai moi-même à pouvoir connaître, tout en en sachant l'existence, que très tardivement, il est une courbe (3) qui, sans retoucher l'axe des x (mais ceci ne saurait étonner, car le zéro absolu de l'opacité, ou la transparence parfaite, serait certainement difficile à saisir, même sur une plaque vierge), montre un relèvement qui ne laisse plus guère de place au doute sur l'allure définitive de la courbe photographique.

Expériences. — Des expériences simples (4) devaient m'en fournir

---

(1) Aussi l'auteur « ne comprend-il pas l'*état neutre* de M. Janssen, où la plaque serait uniformément claire à la révélation. Il y a toujours, dans les phases intermédiaires, des parties presque retournées, alors que d'autres ne font que commencer; les unes franchement positives, les autres franchement négatives ». De fait, même avec deux valeurs seulement, il n'est possible d'obtenir l'uniformité (dite état neutre) qu'en grisaille claire, ce qui explique que ni M. Janssen ni MM. Lumière ne parlent d'un retour au zéro, jamais réalisable strictement que pour une seule valeur à la fois, et peut-être même (quoique, en soi, peu vraisemblable) pour une seule valeur d'élection parmi toutes.

(2) H. Bouasse, *Etude des actions photographiques* (*Ann. Fac. Sc. de Toulouse*, VIII F, 1894).

(3) P. 26, *fig.* 12.

(4) Le procédé simple, comme il est ordinaire, fit suite aux compliqués. Ne parlant que pour mémoire d'une série d'expériences faites en tendant sur le mur d'une chambre noire plusieurs longueurs de pellicules sensibles, progressivement exposées, par le relèvement de caches, à l'action d'une flamme linéaire de bec étalon Giroux agissant, d'une extrémité à l'autre, en raison inverse du carré des distances, je m'astreignais d'abord à découvrir graduellement, à la main, la pellicule enfermée dans un châssis dit négatif ; mais l'étanchéité d'où dépend la netteté des lignes de séparation est toujours difficile à réaliser au soleil, le procédé restant bon pour l'étude des petites valeurs. Je

la confirmation. Au moyen de feuilles de papier blanc aussi homogènes que possible (1), chevauchant les unes sur les autres de centimètre en centimètre, je créais des caches translucides à échelons, capables de donner, sur format 9×12, une série graduée de 10 valeurs dans un sens, 7 dans l'autre, en plus des bandes d'impression maximale (à découvert) ou minimale (sous écran opaque). En croisant orthogonalement deux caches de ce genre, on obtient une série de carrés répartis en bandes à 45°, représentant toutes les valeurs correspondantes des épaisseurs de cache de 1 à 17, ou généralement de 1 à $(m - 2) + (n - 2)$, si m et n sont les côtés de la plaque. Si l'on ne tient pas à voir se répéter, pour le contrôle, la même valeur, et que l'on préfère allonger l'échelle, il suffira de surcharger l'ensemble de la cache $(m - 2)$ de $(n - 2)$ feuillets, en supposant $n > m$, pour avoir une série complète de 1 à $(2n + m - 6)$, soit 27 pour le format 9×12 ou 43 pour 13×18. Entre ces chiffres extrêmes, qui peuvent avoir l'inconvénient de rendre difficile, à cause de l'exagération du relief (2), d'éviter au châssis-presse de mauvais contacts et des ombres portées, il y a suffisamment de latitude pour permettre, sans mesures rigoureuses (3), mais pour toutes durées d'exposition, depuis les plus brèves jusqu'aux plus longues, le tracé de courbes figuratives par la simple corrélation du noircissement et des épaisseurs de la cache.

---

substituai alors au châssis des sortes de gaines-enveloppes en papier noir, d'où la pellicule, doublée d'un carton noir et serrée par des bracelets de caoutchouc contre une bande de velours collée sur un verre de même dimension, se retirait progressivement à la main ; mais il faut de grosses épaisseurs de papier noir pour résister aux grandes intensités lumineuses. Et comme l'estimation des temps de pose, lorsque la source lumineuse est essentiellement variable, perd toute signification, il me parut préférable de graduer les intensités indépendamment des variations de la source, en agissant, au moyen de caches fixes, sur la somme totalisée de l'action lumineuse. Les deux procédés sont cependant nettement distincts et devraient, avec des sources étalonnées, être employés séparément : le premier donnant, toutes autres conditions égales, le diagramme des variations du noir avec les temps de pose, l'autre, à temps égaux, pour des intensités diverses.

(1) Poids du papier, $0^{gr},96$ au décimètre carré.

(2) Il y aurait tout intérêt, à un moment donné, à substituer aux $n - 2$ épaisseurs de papier l'opacité, estimée aussi rigoureusement équivalente que possible, d'un papier photographique mince noirci, uniformément ou par échelons.

(3) C'est la difficulté de ces mesures d'opacité qui a limité à un espace relativement restreint les très intéressantes tentatives des trop rares observateurs qui se sont, avant M. Bouasse, attachés à ce sujet, pourtant primordial, depuis Bunsen et Roscoë (1862), Abney (1877), Stolze (1883), Tryer Evans (1887), jusqu'à Miethe, Michalke, Hurter et Driffield (1890), encore Abney (1893), etc.

Et quoique nous n'ayons pu nous livrer encore systématiquement au travail de récolement du très grand nombre d'épreuves exécutées, et que nous soyons loin d'avoir obtenu du soleil du Midi tout ce qu'avec l'été il pourra donner, nous ne craignons pas d'affirmer, d'après ce que nous a déjà fourni le pâle ciel d'hiver de Paris, l'existence certaine d'un relèvement de la courbe des noircissements après une chute très voisine de zéro (1), et la très probable existence d'une seconde descente, après un second maximum, vraisemblablement moins élevé que le premier. Aller plus loin n'est pas permis pour le moment. Mais il paraîtra certainement intéressant de voir ainsi justifier après coup le tracé à double ondulation par lequel M. Vogel (2) nous avait paru, d'abord, avoir un peu témérairement généralisé le simple énoncé de faits, interprétables encore autrement, qu'avait formulé M. Janssen, et dépassé la pensée même de cet auteur en ajoutant à son deuxième maximum un deuxième minimum.

Appareil pour l'observation et l'enregistrement automatique des orages ;

Par M. A. Turpain (3).

Cet appareil, qui est en expérience à l'Observatoire météorologique du Puy-de-Dôme, réalise le dispositif suivant :

Une série de sept cohéreurs de sensibilités différentes sont en relation avec l'antenne. Un seul des cohéreurs, le plus sensible, est en circuit fermé sur un relais Claude. Les six autres, de sensibilités graduellement croissantes, sont en circuits ouverts. Leurs sensibilités, qui se trouvent de ce fait diminuées (4), restent *relativement* les mêmes.

(1) Chute beaucoup plus prompte qu'on ne pourrait croire. En moins d'une heure on l'obtient, sur Vitrose Lumière, avec un éclairement de 2000 lux (bec acétylène de 20 pyrs à 10 centimètres) ; et une seule minute à la lumière du jour, même pâle, arrive à le faire dépasser sur Kodoïd Eastman. Ces dernières pellicules, à cause de leur minceur, qui réduit au minimum les effets dits de *halo*, seraient de beaucoup les plus propices pour ce genre d'expériences, si leur orthochromatisation, qui donne. dans le spectre, deux maxima, dont un principal dans le rouge, n'était de nature à fausser des résultats d'un caractère général.

(2) H.-W. Vogel, *Das Licht im Dienste der Photographie* (*Handbuch der Phot.*, p. 80, fig. 27; 1894).

(3) Séance du 17 Juin 1904.

(4) *Sur le fonctionnement des cohéreurs associés* (Soc. fr. de Physique, séance du 19 février 1904).

Lorsqu'une décharge atmosphérique impressionne l'appareil, le cohéreur en circuit (cohéreur de démarrage) fait naître un courant qui sert à déclencher l'appareil. Un commutateur tournant, entraîné par un poids, peut alors effectuer un tour complet et revient au repos (position d'enclenchement).

Pendant que le commutateur tourne, la relation de l'antenne avec les cohéreurs se trouve supprimée. L'influence de décharges atmo-

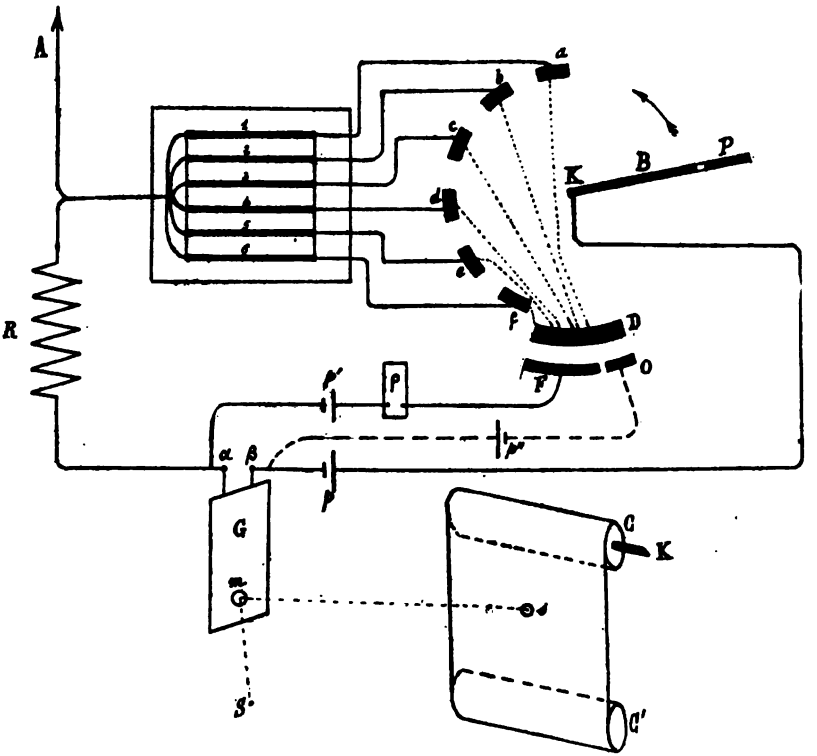


Fig. 1.

sphériques qui viendraient troubler l'enregistrement est ainsi évitée. La durée de la rotation du commutateur est d'ailleurs réduite au minimum.

En effectuant sa rotation complète, le commutateur produit les opérations suivantes :

1° Interrogation des six cohéreurs de sensibilités graduées qui, introduits successivement dans le circuit d'un galvanomètre très

sensible, permettent d'enregistrer photographiquement les élongations successives du galvanomètre sur une plaque sensible mobile ;

2° Décohésion des cohéreurs sur lesquels un frappeur agit pendant un temps suffisant ;

3° Envoi d'un courant de contrôle dans le galvanomètre (de sens contraire aux courants d'enregistrement), par l'intermédiaire des cohéreurs. Ce courant permet de s'assurer que la décohésion des cohéreurs s'est bien produite et que les enregistrements suivants pourront entrer en ligne de compte.

L'intensité des décharges électriques d'origine atmosphérique se trouve ainsi automatiquement et successivement enregistrée par le nombre et la valeur des élongations inscrites. L'observation des décharges et la détermination de leur intensité en fonction du temps est ainsi rendue possible, à distance, au cours d'un orage.

Un enregistreur Richard permet d'inscrire l'époque des décharges successives.

La *fig.* 1 donne un schéma du dispositif.

La thermodynamique et les théories cinétiques ;

Par M. H. A. Lorentz [1].

En physique mathématique, on se sert de deux espèces de théories qui peuvent toutes les deux nous faire comprendre dans une certaine mesure ce qui se passe dans le monde matériel, et qui pourtant sont très différentes par leur nature et par le but qu'elles se proposent. Dans les théories de la première sorte, on cherche à pénétrer le mécanisme intime des phénomènes ; on s'efforce à se représenter le mouvement des molécules, des atomes, et, comme on doit ajouter de nos jours, des ions et des électrons ; on détermine les vitesses, les dimensions, les masses et les charges électriques de ces particules extrêmement petites.

Tout cela est étranger aux théories de la deuxième espèce. Les physiciens qui préfèrent ces dernières ne s'occupent que de grandeurs qui sont plus directement accessibles à nos observations,

---

(1) Conférence faite le 27 avril 1905.

des températures, des quantités de chaleur, des courants électriques, etc. Après avoir mesuré ces grandeurs, on établit leurs relations mutuelles et on démontre que ces relations s'accordent avec certains principes généraux, parmi lesquels la loi de la conservation de l'énergie et la seconde loi de la thermodynamique sont les plus importants.

J'ai cru que vous me permettriez, dans cette conférence que j'aurai l'honneur de faire devant vous, de vous présenter quelques réflexions sur ces deux méthodes et de jeter un coup d'œil rapide sur la manière dont elles s'appliquent à un certain nombre de cas particuliers. Je prendrai mes exemples parmi ceux qui appartiennent à la théorie de la chaleur; j'aurai donc à parler, d'une part, de la thermodynamique et plus spécialement de la seconde loi, du principe de Carnot-Clausius, et, d'autre part, des théories cinétiques, c'est-à-dire de celles qui sont basées sur la notion d'un mouvement moléculaire. Je vous prie cependant de prendre cette dernière expression dans un sens un peu général, car ce ne seront pas seulement les molécules, mais aussi les électrons que nous supposerons animés d'une vitesse d'autant plus grande que la température est plus élevée.

Tout le monde est d'accord sur le rôle important que la thermodynamique, aussi bien que la théorie cinétique, a joué dans le développement de notre science. Il serait superflu d'en énumérer de nombreux exemples. Mais permettez-moi de vous rappeler quelques résultats. La thermodynamique nous a fait prédire l'influence de la pression sur le point de congélation de l'eau; elle fournit des règles pour les variations de température qui accompagnent les changements adiabatiques, par exemple l'allongement ou la contraction d'un fil métallique, et elle est devenue le fondement d'une science nouvelle, celle des équilibres moléculaires et chimiques.

Dans presque tout ce domaine, les théories cinétiques doivent, à l'heure qu'il est, se déclarer impuissantes. En revanche, la théorie cinétique des gaz nous a dévoilé la relation qui existe entre le coefficient du frottement intérieur et celui de la conductibilité calorifique; elle a démontré, avant qu'on ne l'eût observé, que ces coefficients sont indépendants de la densité, et, en s'appuyant sur le principe de Doppler, M. Michelson en a su tirer une explication de la largeur que présentent les raies spectrales, même des gaz les plus raréfiés.

Ces résultats montrent bien, à ce qu'il me semble, que les deux

théories doivent être également bien fondées et nous portent à croire que, tout bien considéré, elles ne pourront dans aucun cas être réellement antagonistes ou irréconciliables. Il est donc permis d'admettre que tous les résultats qu'on tire de la thermodynamique pourront aussi être obtenus au moyen des théories cinétiques. Si nous pouvions nous faire une idée suffisamment exacte des mouvements et des forces moléculaires dans une masse d'eau, un morceau de glace ou un fil de cuivre, il serait possible d'arriver par leur étude à calculer le point de fusion sous une pression donnée et l'échauffement produit dans le fil par une contraction brusque. On peut même présumer que, pour accomplir tout cela, il ne sera pas nécessaire d'approfondir dans tous leurs détails les mouvements invisibles à l'intérieur des corps. Le principe de Carnot-Clausius doit correspondre à quelque propriété générale de ces mouvements; il suffira donc de connaître cette propriété ou, ce qui revient au même, de donner une déduction de la seconde loi de la thermodynamique basée sur la mécanique des systèmes moléculaires.

Malheureusement, malgré les efforts des physiciens, ce problème important, qu'on trouve traité dans le dernier chapitre de la *Thermodynamique* de M. Poincaré, est loin d'avoir trouvé une solution entièrement satisfaisante. Pour vous en montrer la difficulté, je me permets de préciser un peu la question, en me bornant, pour simplifier, à la considération des états d'équilibre.

Si l'on détermine un état d'équilibre d'un système quelconque par un certain nombre de paramètres α, β, γ, ..., et un changement infiniment petit de cet état par les différentielles $d\alpha$, $d\beta$, $d\gamma$, ..., on pourra représenter la quantité de chaleur qu'il faut communiquer au système pour que ce changement s'accomplisse par une expression de la forme :

$$A d\alpha + B d\beta + C d\gamma + \ldots, \tag{1}$$

dans laquelle les coefficients A, B, C, ..., seront des fonctions des paramètres. Or, la loi dont il s'agit nous apprend qu'en divisant cette expression par la température absolue T, on obtiendra une différentielle exacte ; en d'autres termes, la température est un diviseur intégrant de l'expression qu'on trouve pour la quantité de chaleur.

Il est clair qu'avant d'aborder la démonstration de ce théorème il

faudra prouver que la notion de température est applicable au système. Il faudra donc rendre compte des faits expérimentaux sur lesquels cette notion se fonde et dont il suffira de rappeler le suivant :

Si trois corps se trouvent dans des états tels qu'il n'y a aucun échange de chaleur lorsqu'on met le premier en contact avec le deuxième ou le troisième, ces deux derniers pourront également être mis en contact, sans que l'un cède ou enlève de la chaleur à l'autre.

Voilà une règle bien simple, dont nous devrions tout d'abord donner une déduction générale, en n'introduisant, bien entendu, que des hypothèses qui sont applicables à tous les corps, solides, fluides et gaz. Mais, malheureusement, il y a dans cela des difficultés très graves, que jusqu'à présent il a été impossible de surmonter. Ce n'est que pour quelques cas très simples que la théorie a pu conduire à cette loi de l'équilibre de température.

Il ne faut pas croire cependant qu'on n'ait fait aucun progrès vers le but de fonder la thermodynamique sur les principes de la mécanique. On doit à Helmholtz [1] des recherches importantes sur une classe de systèmes dont les mouvements présentent une étroite analogie avec les phénomènes de la chaleur. Ces systèmes, qu'on appelle *monocycliques*, sont caractérisés par ceci, que leur mouvement peut être entièrement défini par une seule grandeur qui joue le rôle d'une vitesse ; de plus, dans le cours du mouvement, les propriétés du système ne changent en aucune façon. Pour en avoir un exemple, concevons un tube annulaire R (*fig.* 1) entièrement rempli d'un fluide incompressible et dont la paroi peut prendre des dimensions et des formes très variées sous l'action des pressions du fluide intérieur et d'un système de forces extérieures F qu'on lui applique. Supposons qu'il n'y ait aucun frottement, ni dans le fluide, ni entre celui-ci et la paroi ; alors, le fluide, une fois mis en mouvement dans le sens des flèches, ne cessera jamais de circuler.

Je vais vous indiquer maintenant la ressemblance de ce système avec ceux qu'on étudie dans la théorie de la chaleur, avec une masse gazeuse, par exemple, enfermée dans un cylindre sous un piston mobile, et, pour simplifier, je donnerai au tube une forme circulaire telle que vous la voyez dans la *fig.* 2. Pour ne pas déran-

---

(1) Helmholtz, *Studien zur Statik monocyklischer* (*Systeme Sitzungsberichte der Akad. d. Wiss.*, Berlin, pp. 159, 311 ; 1884).

ger cette symétrie, les forces extérieures doivent avoir la direction indiquée par les flèches F ou bien la direction opposée; elles doivent,

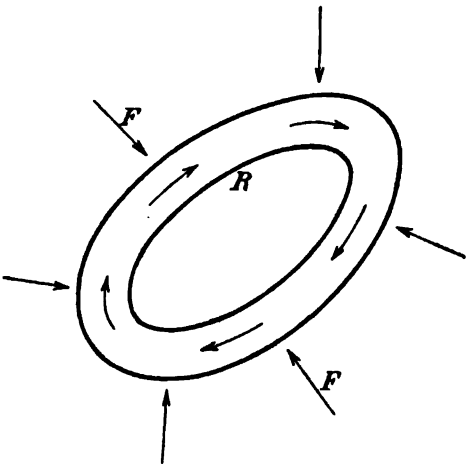


Fig. 1.

en outre, être uniformément réparties sur toute la circonférence. Cela posé, on peut comparer la circulation du fluide aux mouvements

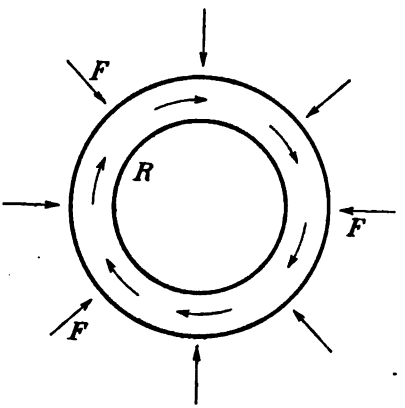


Fig. 2.

moléculaires dans le gaz, et les forces dont je viens de parler à la pression extérieure que nous exerçons sur le piston. En augmentant cette pression, vous pouvez faire descendre le piston; cela élèvera

l'intensité du mouvement moléculaire. De même, lorsque, par un accroissement des forces F, vous donnez à notre anneau un diamètre plus petit, le fluide acquerra une plus grande vitesse.

Pour que l'analogie soit complète, il faut encore se figurer que, par quelque moyen, on peut agir directement sur la circulation du fluide, en l'accélérant ou en la ralentissant par des forces dans la direction du courant ou dans le sens contraire. Le travail positif ou négatif de ces forces, disons le « travail cyclique », correspondra à une quantité de chaleur communiquée ou enlevée à la masse gazeuse.

Donnons maintenant à notre anneau un changement infiniment petit quelconque, consistant dans des variations simultanées du rayon et de la vitesse du mouvement interne. On peut alors calculer le travail cyclique et on peut démontrer que l'expression à laquelle on arrive devient une différentielle exacte après division par la valeur de l'énergie cinétique du fluide par unité de volume. Cela reste encore vrai dans le cas d'un tube de forme quelconque pour lequel la détermination de l'état exige un plus grand nombre de paramètres que pour le tube circulaire dont nous venons de parler.

Nous voilà donc bien près de la loi thermodynamique; nous n'avons plus qu'à arranger les choses de façon que l'énergie cinétique par unité de volume joue le rôle de la température. C'est ce qu'on peut faire sans difficulté. Supposons que nous ayons un certain nombre de ces tubes annulaires et que, par quelque mécanisme qu'on pourrait bien inventer, nous puissions établir une liaison entre le mouvement du fluide dans deux tubes, cette liaison étant telle qu'elle exige l'égalité des vitesses dans les deux systèmes. Alors, si l'on fait s'*engrener*, pour ainsi dire, deux tubes pour lesquels l'énergie cinétique par unité de volume a la même valeur, leur état ne changera pas; l'énergie cinétique correspond donc bien à la température.

L'analogie que je viens de faire ressortir est certainement très curieuse, et il ne me semble pas douteux qu'avec cette théorie des systèmes monocycliques Helmholtz ait indiqué ce qui doit être le point essentiel dans une déduction mécanique de la loi thermodynamique. En effet, le mouvement moléculaire a précisément les deux propriétés que nous avons rencontrées dans le mouvement d'un système monocyclique. Son intensité peut à chaque instant être définie par une seule grandeur, par exemple par l'énergie cinétique totale

du corps, et le mouvement peut continuer indéfiniment sans que cela produise le moindre changement dans l'état du système.

Mais, il faut bien le reconnaître, malgré tout cela il y a une profonde différence. Tandis que dans notre anneau le fluide se meut pour ainsi dire tout d'une pièce, les molécules des corps ont des mouvements extrêmement différents, non seulement par leur direction, mais aussi par leur vitesse. Il n'est pas permis d'appliquer immédiatement à ce mouvement irrégulier les résultats qu'on a trouvés pour le cas beaucoup moins compliqué des anneaux remplis de fluide. Les problèmes que présente un système composé d'innombrables particules demandent à être examinés séparément et par une méthode propre à ce genre de questions. Maxwell a déjà tracé la route à suivre [1] en créant sa méthode statistique, qui, du reste, est très naturelle et se présente presque d'elle-même. Comme il est impossible de suivre dans la pensée les molécules individuelles, on est amené à les réunir en groupes tels que les molécules qui appartiennent au même groupe puissent être considérées comme ayant le même état de mouvement. On porte alors son attention sur le nombre des molécules qui se trouvent dans un groupe déterminé et sur les changements de ce nombre d'un instant à l'autre, et on examine la part que les différents groupes ont dans les propriétés d'ensemble du système et dans les phénomènes qu'on peut observer.

Vous voyez que cela ressemble beaucoup à la statistique qu'on ferait d'une population, et vous pensez bien que l'on n'a pas à craindre que le nombre des individus, c'est-à-dire des molécules, soit trop petit pour permettre l'application des méthodes de la statistique : le nombre des molécules, même dans 1 millimètre cube d'un gaz, est tellement élevé qu'aucune population ne pourra jamais y atteindre.

La méthode statistique a été développée comme une branche de la mécanique dans le dernier livre de Gibbs : *Principes élémentaires de mécanique statistique*, et M. Boltzmann [2] s'en est servi avec beaucoup de succès dans ses études sur la théorie moléculaire. Je mentionnerai un théorème très important qui a été ainsi, sinon rigoureusement démontré, du moins rendu très probable. *C'est que, pour une température donnée, toute particule individuelle quelle qu'elle*

---

(1) Maxwell, *Phil. Mag.*, 4e série, t. XIX, p. 19; 1860; t. XX, p. 21; 1860; — t. XXXV, p. 129, 185; 1868.

(2) Voir Boltzmann, *Leçons sur la théorie des gaz*, traduites par A. Gallotti et H. Bénard; Paris, 1902-1905.

soit, molécule, atome ou ion, qui prend part au mouvement moléculaire, a en moyenne, dans chaque corps, la même énergie cinétique, et que cette énergie est proportionnelle à la température absolue T, *de sorte qu'elle peut être représentée par* αT, *où* α *est une constante universelle.*

C'est un résultat, ou, si vous voulez, une hypothèse dont nous aurons encore à nous servir, et vous retrouverez la constante α dans plusieurs de nos équations.

Quant à la déduction de la seconde loi de la thermodynamique, bien que nous en ayons le modèle dans la théorie des systèmes monocycliques et l'instrument nécessaire dans la méthode statistique, elle reste encore à faire. Aussi me permettrez-vous de n'y plus insister.

Passons plutôt aux problèmes spéciaux que je voudrais vous présenter. Si ces problèmes sont un peu décousus et si, en les discutant, je semble quelquefois perdre de vue mon sujet principal, qui est le rapport entre la thermodynamique et les théories cinétiques, j'espère que vous voudrez bien m'en excuser.

Considérons d'abord une masse gazeuse, enfermée dans un cylindre vertical C (*fig.* 3) *et soumise à l'action de la pesanteur. Quel sera l'état stationnaire qui s'établira dans ce système?*

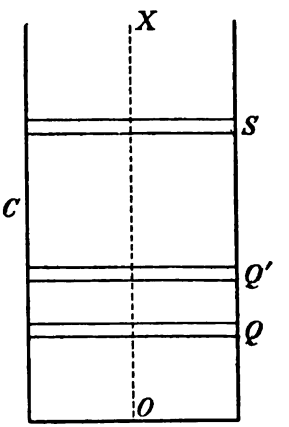


Fig. 3.

La thermodynamique a sa réponse toute prête. Elle exige que la température soit la même à toutes les hauteurs, car, s'il en était

autrement, vous pourriez facilement imaginer une expérience dans laquelle la chaleur serait transportée d'un corps froid à un corps chaud, contrairement au principe de Carnot-Clausius.

Voilà déjà un résultat qu'il semble difficile de concilier avec la théorie cinétique. En effet, au premier abord, on croirait pouvoir raisonner de la manière suivante : Une molécule qui descend aura, sous l'action de la pesanteur, un mouvement accéléré, une autre qui monte perdra en vitesse. Par conséquent, dans la partie inférieure de la colonne, on trouvera des vitesses plus grandes que dans la partie supérieure, c'est-à-dire que la température sera plus élevée à la base qu'au sommet de la colonne, puisque c'est la force vive moyenne qui détermine la température.

Heureusement, cette première difficulté peut être surmontée. Maxwell a montré [1], il y a presque quarante ans, que si l'on remplace ce raisonnement superficiel par un autre plus rigoureux, basé sur la méthode statistique, on doit en réalité conclure à l'égalité de la température dans toute la colonne.

Je vais vous indiquer la solution de Maxwell et en donner la vérification. Introduisons à cet effet trois axes de coordonnées perpendiculaires entre eux, dont le premier OX est dirigé vers en haut, et nommons ξ, η, ζ, les composantes de la vitesse d'une molécule suivant ces axes et g l'accélération qui est produite par la pesanteur. Soit dx l'épaisseur d'une couche horizontale que nous appellerons Q, et qui est située à la hauteur x ; cette couche est regardée comme infiniment mince pour nos observations, ce qui n'empêche pas qu'elle ne contienne un nombre énorme de molécules. Parmi toutes ces particules il y en a un certain nombre pour lesquelles la première composante de la vitesse est comprise entre ξ et $\xi + d\xi$, la seconde entre η et $\eta + d\eta$, la troisième entre ζ et $\zeta + d\zeta$, les intervalles $d\xi$, $d\eta$, $d\zeta$ étant extrêmement petits par rapport aux vitesses mêmes, mais suffisamment grands pour que le groupe de molécules qu'ils servent à déterminer soit encore très nombreux. Cela posé, on peut dire, selon Maxwell, que le nombre des molécules de ce groupe qui se trouvent à un certain moment dans la couche dx peut être représenté par l'expression :

$$(2) \qquad A e^{-2ghx} e^{-h(\xi^2+\eta^2+\zeta^2)} d\xi d\eta d\zeta dx,$$

dans laquelle A et h sont des constantes.

---

(1) Maxwell, *Phil. Mag.*, 4e série, t. XXXV, p. 215; 1868.

Peut-être vous trouverez cela un peu compliqué ; mais, si vous prenez en considération que cette expression renferme à elle seule toute la statistique des mouvements moléculaires et qu'elle permet d'indiquer précisément l'état du gaz à n'importe quelle hauteur, vous conviendrez que la formule est vraiment très simple.

Arrivons maintenant à la vérification. Grâce au facteur

$$e^{-h(\xi^2+\eta^2+\zeta^2)},$$

l'état représenté par l'expression (2) a la propriété de n'être pas dérangé par les chocs mutuels des molécules. Maxwell en a donné une démonstration que je ne reproduirai pas ici. Si je mentionne ce théorème, c'est pour avoir le droit de faire abstraction des chocs. J'aurai donc à faire voir, en admettant que chaque molécule peut librement poursuivre son chemin, que l'état n'est pas dérangé non plus par l'action de la pesanteur.

L'état du gaz sera évidemment stationnaire lorsque, dans une couche quelconque, on trouvera à chaque instant le même nombre de particules animées d'une vitesse donnée ; alors, bien que ce soient toujours de nouvelles molécules qui se trouvent dans une couche, les propriétés d'ensemble que seules on peut observer n'auront pas changé.

Soit maintenant t un intervalle de temps quelconque. Au commencement de cet intervalle, la couche dx contient un nombre de molécules donné par l'expression (2), pour lesquelles les composantes de la vitesse sont comprises entre les limites que j'ai indiquées. Mais ces molécules ne tarderont pas à quitter la couche considérée. Au bout du temps t, on les retrouve dans une couche Q′ située à une hauteur que j'appellerai x', et avec une vitesse dont les composantes peuvent être représentées par ξ', η, ζ, la deuxième et la troisième composante n'ayant pas changé. On peut démontrer que l'épaisseur de la nouvelle couche peut être censée égale à l'épaisseur dx et que les écarts entre les valeurs extrêmes des composantes de la vitesse sont encore $d\xi$, $d\eta$, $d\zeta$. On voit ainsi que le nombre des molécules qui, après l'intervalle t, se trouvent dans la couche Q′, et dont les vitesses sont comprises entre ξ' et $\xi' + d\xi$, η et $\eta + d\eta$, ζ et $\zeta + d\zeta$, est donné par l'expression (2). D'un autre côté, si l'état est stationnaire et si, par conséquent, la formule (2) s'applique à tous les instants, c'est encore ce même nombre que l'on doit obtenir

lorsqu'on remplace x par x' et ξ par ξ'. Il faut donc que l'on ait :

$$Ae^{-2ghx-h(\xi^2+\eta^2+\zeta^2)} = Ae^{-2ghx'-h(\xi'^2+\eta^2+\zeta^2)}.$$

On voit immédiatement que cela a lieu en effet, car, pour une molécule soumise à l'action de la pesanteur, les vitesses ξ et ξ', dans le sens vertical, qu'elle possède aux hauteurs x et x', satisfont à la relation :

$$2gx + \xi^2 = 2gx' + \xi'^2.$$

Regardons maintenant l'expression (2) d'un peu plus près. Elle contient deux facteurs dont le premier dépend seulement de x et le second de ζ, η, ξ. Cela veut dire que, lorsque x vient à changer, les nombres des molécules contenues dans les différents groupes qui se distinguent par leurs vitesses changeront tous dans le même rapport. Ainsi, si vous faites la statistique des molécules situées dans une couche Q et ensuite celle des molécules qui se trouvent dans une couche S, vous trouverez pour les différents groupes des nombres qui se distinguent par un facteur constant. C'est comme si l'on avait affaire à deux populations et si à chaque nombre d'habitants d'un certain âge dans la première il correspondait dans la seconde un nombre deux fois plus grand d'habitants du même âge. L'âge moyen serait alors le même dans les deux cas. De la même manière vous pouvez conclure que la vitesse moyenne et l'énergie cinétique moyenne sont les mêmes à toutes les hauteurs ; la température ne varie donc pas d'une couche à l'autre.

Quant à la densité, elle est évidemment proportionnelle au facteur e^{-2ghx}. On peut démontrer que cela s'accorde avec la loi qu'on obtient dans la théorie ordinaire de l'équilibre d'une masse gazeuse : c'est la loi dont on se sert lorsqu'on veut mesurer la hauteur des montagnes par le baromètre.

Nous pourrions maintenant passer à des systèmes de plus en plus compliqués, en essayant toujours de nous en former des images conformes aux déductions thermodynamiques. Pour en avoir un exemple qui n'est pas sans un certain intérêt, nous pouvons supposer *que le gaz dont je viens de parler et que je désignerai, pour abréger, par la lettre* M, *puisse se décomposer en deux autres* M_1 *et* M_2 *par une dissociation aboutissant à un état d'équilibre.* En somme, on aura alors un mélange de trois gaz M, M_1, M_2, et le degré de disso-

ciation, qui dépend de la densité, ne sera pas le même dans toute l'étendue de notre colonne verticale.

Cependant la thermodynamique exige que, malgré les variations des densités, l'équilibre subsiste simultanément dans toutes les couches horizontales. C'est de nouveau un résultat dont la théorie cinétique peut rendre compte.

Il suffit de se rappeler, ce qu'on démontre facilement, que la constante h dans notre formule (2) est proportionnelle au poids moléculaire du gaz, et de faire intervenir la loi de la dissociation bien connue de Guldberg et Waage.

En désignant par Δ, Δ_1, Δ_2 les densités des trois gaz, nous pouvons exprimer cette loi par la formule :

$$\Delta = k\Delta_1\Delta_2, \tag{3}$$

où k est une constante et où l'on a supposé qu'une molécule du gaz M se décompose en une molécule de M_1 et une molécule de M_2. D'un autre côté, nous pouvons nommer h, h_1 et h_2 les constantes qui entrent dans les formules de Maxwell, si on les applique aux trois corps; l'équilibre de chaque gaz considéré séparément exige alors que les densités varient d'une couche à l'autre dans les mêmes proportions que les grandeurs :

$$e^{-2ghx}, \qquad e^{-2gh_1x}, \qquad e^{-2gh_2x};$$

en d'autres termes, qu'elles peuvent être représentées par

$$\Delta = Ce^{-2ghx}, \qquad \Delta_1 = C_1e^{-2gh_1x}, \qquad \Delta_2 = C_2e^{-2gh_2x}.$$

Comme les coefficients h, h_1, h_2 sont proportionnels aux poids moléculaires et que le poids moléculaire du gaz M est la somme de ceux de M_1 et de M_2, on aura :

$$h = h_1 + h_2.$$

Transportons maintenant les valeurs de Δ, Δ_1 et Δ_2 dans l'équation (3); on peut diviser par le facteur e^{-2ghx}, qui est égal au produit de e^{-2gh_1x} et e^{-2gh_2x}, et notre égalité se réduit à :

$$C = kC_1C_2.$$

Comme la coordonnée x a disparu, l'équilibre peut bien exister dans toutes les couches à la fois [1].

Jusqu'ici je n'ai parlé que de corps gazeux qui ont une densité tellement petite qu'ils obéissent aux lois de Boyle et de Gay-Lussac. Les problèmes deviennent beaucoup plus difficiles lorsqu'on passe à des états de la matière plus denses. Aussi la formule si féconde par laquelle M. van der Waals a rendu compte de la continuité des états fluide et gazeux n'est-elle qu'approchée et, dans sa belle théorie des mélanges, ce physicien a-t-il dû se servir à la fois de raisonnements qui sont fondés sur la théorie moléculaire et d'autres qui appartiennent à la thermodynamique.

Pour vous donner un exemple d'un problème que la théorie cinétique n'est pas encore parvenue à résoudre, bien qu'il ne s'en faille pas de beaucoup, je dirai quelques mots de *l'équilibre d'une dissolution diluée assujettie à l'action de la pesanteur*.

Vous savez qu'on peut rattacher plusieurs propriétés d'une telle dissolution à la notion de la pression osmotique. Si nous nous servons de cette notion, nous trouverons facilement la règle qui régit les variations de la concentration dans le sens vertical.

Figurez-vous, à cet effet, que la dissolution est contenue dans un cylindre vertical qui est plongé dans le fluide dissolvant, disons dans l'eau, et dont les parois inférieures et supérieures sont semi-perméables. Selon la thermodynamique, il y aura certainement un état d'équilibre.

Appelons, dans cet état, p_1 et p_2 les pressions qui existent dans

---

(1) Il est facile d'étendre le raisonnement précédent au cas où la réaction entre les trois gaz est représentée, dans la notation bien connue, par la formule :

$$nM \rightleftarrows n_1M_1 + n_2M_2,$$

n, n_1, n_2 étant des nombres entiers quelconques. Alors, en raison de la proportionnalité des coefficients h, h_1, h_2 et des poids moléculaires, on aura :

$$nh = n_1h_1 + n_2h_2,$$

tandis que la loi de Guldberg et Waage prend la forme

$$\Delta^n = k\Delta_1^{n_1}\Delta_2^{n_2}.$$

La condition d'équilibre

$$C^n = kC_1^{n_1}C_2^{n_2}$$

est de nouveau indépendante de la hauteur.

la dissolution aux bases inférieure et supérieure du cylindre, p'_1 et p'_2 les pressions qu'on trouve dans l'eau qui est en contact avec ces mêmes parois, O_1 et O_2 les pressions osmotiques à la base et au sommet de la colonne. On aura par définition :

$$p_1 - p'_1 = O_1, \qquad p_2 - p'_2 = O_2.$$

Je supposerai que la section horizontale du cylindre soit égale à l'unité de surface et qu'on puisse négliger l'épaisseur des parois. Alors, si Q est le poids de la dissolution contenu dans le cylindre et Q′ celui d'un volume égal d'eau, on trouve :

$$p_1 - p_2 = Q, \qquad p'_1 - p'_2 = Q',$$

donc

$$O_1 - O_2 = Q - Q'. \tag{4}$$

C'est la règle cherchée, car elle nous fait connaître les différences des valeurs que la pression osmotique présente à des hauteurs différentes, et ces valeurs sont intimement liées aux concentrations.

Si l'on essaie maintenant de retrouver ce même résultat en se servant de la théorie moléculaire, on trouve que cela est, en effet, possible, pourvu qu'on admette *une* chose qu'on n'a pas encore pu démontrer rigoureusement [1]. Si, dans un litre d'eau, vous dissolvez un peu de sel et si vous voulez que le mélange occupe encore le volume d'un litre, il faut d'abord enlever une petite quantité d'eau. On peut dire que cette petite quantité d'eau a été remplacée ou déplacée par le sel. Or, pour arriver à la formule (4), il faut admettre que, dans une dissolution qui est soumise à la pesanteur, les molécules du sel éprouvent dans leur ensemble, de la part des molécules de l'eau, une force égale et contraire au poids de l'eau déplacée.

Ce théorème, qui nous rappelle le principe d'Archimède, est d'une telle simplicité qu'on peut bien espérer pouvoir le démontrer par un raisonnement direct. Si l'on y réussit, on aura de nouveau établi l'accord avec la thermodynamique.

La conclusion qui se dégage de tous ces exemples me semble être la suivante : Bien que la thermodynamique doive rester pour long-

---

[1] Lorentz, *Sur la théorie moléculaire des dissolutions diluées* (*Archives néerlandaises*, XXV, p. 107 ; 1892).

temps notre guide le plus sûr dans le dédale des phénomènes, nous avons de bonnes raisons pour développer de plus en plus les théories cinétiques. Elles ne remplaceront pas de sitôt le principe de Carnot-Clausius, mais elles peuvent être très utiles pour élucider ce qu'on déduit des formules de la thermodynamique, qui en elles-mêmes ne parlent guère à l'imagination.

Je vous propose maintenant de continuer notre comparaison des deux manières de voir en nous plaçant dans un autre domaine de la physique.

Examinons d'abord *les phénomènes thermo-électriques*, c'est-à-dire : 1° la force électromotrice qui est produite dans un circuit composé de deux métaux par une différence des températures des contacts; 2° le dégagement ou l'absorption de chaleur à ces contacts qui est connu sous le nom de l'effet Peltier, et 3° l'effet thermique dans un métal inégalement chauffé et parcouru par un courant électrique.

Ces divers effets sont liés entre eux par des formules thermodynamiques que Clausius (1) et lord Kelvin (2) ont été les premiers à développer. Lord Kelvin a même pu prédire ainsi le dernier des trois phénomènes. Il a conclu de ses équations qu'un courant électrique, qui est dirigé des parties chaudes vers les parties froides du métal, doit produire dans quelques métaux un développement et dans d'autres une absorption de chaleur, ces effets étant renversés dans tous les cas lorsqu'on renverse la direction du courant. L'expérience ne tarda pas à confirmer cette prévision de la manière la plus éclatante.

La théorie cinétique est longtemps restée en arrière, et ce n'est que dans les dernières années que M. Riecke (3) et M. Drude (4) ont fait à ce sujet une heureuse application de la théorie des électrons. Je vous la présenterai avec une certaine simplification que je vais d'abord justifier.

De nombreuses recherches ont montré que la masse des électrons

---

(1) Clausius, *Pogg. Ann.*, XC, p. 513; 1853; — *Die mechanische Wärmetheorie*, 2e édition, Braunschweig, t. II, p. 170; 1879.

(2) W. Thomson, *Edinburgh Roy. Soc. Trans.*, XXI; 1854.

(3) Riecke, *Zur Theorie des Galvanismus und der Wärme* (*Ann. der Physik u. Chemie*, LXVI, pp. 353, 545, 1199; 1898).

(4) Drude, *Zur Elektronentheorie der Metalle* (*Ann. der Physik*, I, p. 566; 1900; — III, p. 369; 1900).

négatifs qui constituent les rayons cathodiques et les rayons β du radium est très inférieure à celle d'un atome d'hydrogène; elle n'en est que la millième ou la deux-millième partie, de sorte qu'on peut dire que ces particules, qui sont lancées par le radium avec des vitesses énormes, sont les plus petites dont nous ayons connaissance. Au contraire, pour les électrons positifs, qui sont également émis par le radium dans les rayons α, et qu'on retrouve dans certains phénomènes de décharge électrique, on leur a toujours trouvé une masse qui est de l'ordre de grandeur de celle des atomes eux-mêmes.

Ces résultats nous conduisent à admettre que les charges positives sont toujours liées aux atomes pondérables, et nous supposerons que cela soit vrai aussi pour les métaux et que ce ne soient que les électrons négatifs qui, en se déplaçant dans les espaces intermoléculaires, transportent l'électricité d'un point à l'autre.

Il est vrai que cette conception mène à des difficultés, notamment lorsqu'on veut expliquer l'influence d'un champ magnétique sur le mouvement de l'électricité dans les métaux, mais je ne m'y arrêterai pas. Peu importe du reste que notre hypothèse ne soit pas tout à fait conforme à la réalité; pour notre but, il suffirait même de considérer un métal fictif; nous pourrons donc nous borner à une seule espèce d'électrons libres.

Figurons-nous maintenant que ces particules prennent part au mouvement calorifique dont les atomes pondérables sont animés; alors le système des électrons entre les atomes d'un métal devient un peu comparable à un gaz qui serait enfermé dans un corps poreux. Quant à la vitesse moyenne des électrons, elle doit être très élevée, si nous voulons que l'énergie actuelle moyenne ait la même valeur αT que celle d'une molécule gazeuse. Comme la masse d'un corpuscule peut être estimée à la 2000e partie de celle d'un atome d'hydrogène, c'est-à-dire à la 4000e partie de la masse d'une molécule de ce gaz, la vitesse d'agitation doit être plus de 60 fois plus grande que celle des molécules d'hydrogène à la même température. Cela nous donne, pour la température de 0° C., une vitesse de plus de 100 kilomètres par seconde.

Il ne faut pas croire cependant qu'avec cette vitesse énorme les électrons puissent parcourir de grandes distances en ligne droite.

En réalité, de même que les molécules d'un gaz auxquelles nous venons de les comparer, ils auront un mouvement en zigzag. Après un trajet très court, ils trouvent leur chemin barré par un atome

métallique, et ils ont ainsi à subir des chocs innombrables qui les rejettent tantôt dans une direction, tantôt dans l'autre.

On peut supposer que le nombre des électrons libres par unité de volume a, dans un métal donné et à une température donnée, une valeur déterminée, cette valeur variant d'un métal à l'autre et étant pour chaque corps une fonction de la température. Cette hypothèse est très naturelle lorsqu'on imagine que les électrons mobiles ont été mis en liberté par une espèce de dissociation. En effet, le degré de cette dissociation dépendra sans doute de la température.

Avec ces données, il n'est pas bien difficile de construire une théorie de la thermo-électricité [1]. On peut en premier lieu expliquer la différence de potentiel qui existe entre deux morceaux de métaux différents A et B, qui se trouvent en contact, et cela d'une manière très intéressante. Supposons, pour fixer les idées, que le métal B contienne un plus grand nombre d'électrons libres que le métal A. Alors, grâce à leur mouvement calorifique, un certain nombre de ces électrons se transportera à travers la surface de séparation du métal B vers le métal A. On peut presque dire qu'il y aura évaporation de l'électricité négative dans le premier corps et condensation dans le second. C'est comme si l'on avait placé dans une même enceinte deux sels hydratés à tensions de vapeur différentes.

Cependant, dans le cas des deux métaux, il y a une cause qui, au bout d'un temps très court, mettra fin au processus de distillation. On comprend que, dès que quelques-uns des électrons mobiles se sont portés vers le métal A, ce corps aura reçu par cela même une certaine charge négative, qui est naturellement accompagnée d'une charge positive de B. Les forces électriques qui sont exercées par ces charges s'opposeront au transport de nouveaux électrons et finiront par le faire cesser entièrement. Il y aura donc bientôt un état d'équilibre et on peut démontrer que cet état est caractérisé par une différence de potentiel qui est entièrement déterminée par les nombres N_a et N_b d'électrons que les deux métaux contiennent par unité de volume.

Il faut ajouter qu'une différence de potentiel pourrait aussi être produite par des forces moléculaires s'exerçant à de très petites distances entre les atomes pondérables et les électrons. Si, par

---

[1] Lorentz, *The motion of electrons in metallic bodies* (*Proceedings Acad. of Sc. Amsterdam*, pp. 438, 585, 684; 1904-1905).

exemple, ces derniers étaient plus fortement attirés par le métal A que par B, il en résulterait également une élévation du potentiel de B et un abaissement de celui de A. Seulement, comme ces forces moléculaires ne peuvent jamais donner lieu à un courant dans un circuit fermé, nous pouvons nous dispenser de les prendre en considération.

Voici maintenant comment on peut calculer la force électromotrice qui est mise en jeu dans un circuit thermo-électrique.

Il faut, à cet effet, avoir égard à ce que les nombres N_a et N_b sont des fonctions de la température. Il en résulte non seulement que la différence de potentiel n'est pas la même aux deux contacts, parce qu'ils ont des températures différentes, mais encore que, dans les parties homogènes du circuit, le mouvement calorifique tendra aussi à faire marcher les électrons dans une direction déterminée. En combinant ces divers effets, on arrive à une formule que je me permettrai de placer devant vos yeux. Si l'on représente par T′ et T″ les températures des deux contacts et si la force électromotrice cherchée F est considérée comme positive lorsqu'elle fait naître un courant qui va au travers du premier contact de A vers B, on a :

$$F = \frac{2\alpha}{3e} \int_{T'}^{T''} \log \text{nat} \frac{N_b}{N_a} \, dT.$$

Ici, N_a et N_b ont la signification indiquée, α est la constante universelle dont nous avons déjà parlé, et e n'est autre chose que la charge électrique d'un électron. Si l'on admet avec beaucoup de physiciens que cette charge est égale à celle d'un atome d'hydrogène dans les électrolytes, on peut calculer le rapport $\frac{\alpha}{e}$. On trouve ainsi que le coefficient qui précède l'intégrale a la valeur 8700, si tout est exprimé en unités électro-magnétiques. Donc, si l'on a mesuré F en valeur absolue, on pourra conclure aux valeurs du rapport $\frac{N_b}{N_a}$. Pour deux métaux qui se trouvent aux extrémités de la série thermo-électrique, comme le bismuth et l'antimoine, on obtient pour ce rapport une valeur voisine de 4 ; la direction du courant montre que c'est le bismuth qui doit être le moins riche en électrons mobiles.

La route qu'il nous faut suivre pour expliquer les effets thermiques d'un courant est maintenant toute tracée. On calculera, pour un élément du circuit, le travail des forces qui agissent sur les électrons en vertu des différences de potentiel, et on aura égard en même temps

à l'énergie des particules qui entrent dans cet élément et qui en sortent. En fin de compte, on trouve des formules assez simples pour l'effet Peltier et l'effet Thomson. Je puis m'abstenir de les citer. Il suffira de dire, et c'est ce qui nous intéresse spécialement aujourd'hui, qu'elles s'accordent complètement avec les résultats de Clausius et de lord Kelvin.

Voilà de nouveau un accord très remarquable entre les deux théories que nous voulions comparer. Il l'est d'autant plus qu'à vrai dire nous n'avions pas le droit de nous y attendre. En effet, d'après la théorie des électrons, les phénomènes thermo-électriques sont intimement liés à la conduction de chaleur qui a lieu dans le circuit, tandis que, dans la théorie thermodynamique, il faut précisément faire abstraction de cette conduction, qui est un phénomène irréversible. Si, en nous basant sur la mécanique moléculaire, nous voulons essayer une déduction de la seconde loi de Clausius, nous aurons à montrer pourquoi, dans l'application de cette loi à la thermo-électricité, il est permis de négliger la conduction de la chaleur, bien qu'elle doive être regardée comme un phénomène essentiel.

Le dernier problème dont je me permets de vous entretenir appartient également à un domaine où la théorie des électrons et la thermodynamique se rencontrent. Je veux parler de *la théorie du rayonnement de la chaleur*. Vous savez que cette théorie a été inaugurée par les recherches célèbres de Kirchhoff et qu'on possède maintenant trois lois très importantes, celles de Kirchhoff, de Boltzmann et de Wien.

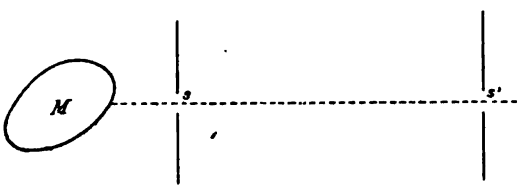


Fig. 4.

Dans ces lois, il s'agit du rapport entre le pouvoir émissif E d'un corps quelconque et son pouvoir absorbant A. Figurons-nous, pour nous rappeler le sens dans lequel Kirchhoff emploie ces termes, que devant le corps M (*fig.* 4) nous avons posé deux écrans dans lesquels on a pratiqué des ouvertures très étroites *s* et *s'*. Une certaine partie

du rayonnement total du corps M aura lieu à travers ces ouvertures, et on peut décomposer cette partie en des rayons de différentes longueurs d'onde.

Cela posé, considérons l'intensité du rayonnement, c'est-à-dire la quantité d'énergie émise par unité de temps, en tant qu'elle appartient aux rayons dont la longueur d'onde est comprise entre les valeurs λ et $\lambda + d\lambda$. On voit facilement qu'elle est proportionnelle aux aires s et s' des ouvertures et inversement proportionnelle au carré de leur distance r. De plus, elle est proportionnelle à $d\lambda$. Elle peut donc être représentée par :

$$\frac{Ess'}{r^2}\, d\lambda,$$

où le facteur E sera, pour un corps donné, une fonction déterminée de la température et de la longueur d'onde λ.

Pour définir le pouvoir absorbant A, nous supposerons qu'un faisceau de rayons dont la longueur d'onde a de nouveau la valeur λ soit dirigé sur le corps M à travers les ouvertures s et s'. Nous entendrons par A la fraction qui nous indique quelle partie de l'énergie incidente est retenue par le corps, et c'est le rapport :

$$\frac{E}{A},$$

dont nous aurons maintenant à parler.

La première de nos trois lois, celle de Kirchhoff [1], nous enseigne que cette grandeur est indépendante de la nature du corps M. Il s'ensuit que le pouvoir émissif E aura une valeur d'autant plus élevée que l'absorption est plus forte. La plus grande valeur de E doit se trouver avec les corps qui absorbent la totalité des rayons incidents ; ce sont les corps parfaitement noirs où, comme je dirai plus simplement, les corps noirs. Pour ceux-ci on aura $A = 1$; donc, si l'on désigne par E_n leur pouvoir émissif, on aura pour tous les autres corps :

$$\frac{E}{A} = E_n.$$

---

[1] Kirchhoff, *Ueber das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht* (*Pogg. Ann.*, CIX, p. 275; 1860).

On peut donc dire que nous avons à étudier l'émission d'un corps noir comme fonction de la température et de la longueur d'onde.

Du reste, cette grandeur E_n ou $\frac{E}{A}$ admet une troisième signification, qui est très curieuse. Concevons une enceinte fermée de toutes parts dont la paroi soit parfaitement noire et soit maintenue à la température T, l'espace intérieur étant vide, je veux dire occupé par l'éther. Cet espace est alors traversé par des rayons innombrables qui s'entrecroisent dans toutes les directions, et il est par cela même le siège d'une certaine énergie. Soit D l'énergie par unité de volume, en d'autres termes, la densité de l'énergie, en tant qu'elle est due aux rayons dont la longueur d'onde est comprise entre λ et $\lambda + d\lambda$. On peut démontrer que la valeur numérique de cette grandeur ne se distingue que par un facteur constant de celle de E_n ; en effet, on a :

$$D = \frac{4\pi}{c} E_n d\lambda,$$

où c représente la vitesse de la lumière.

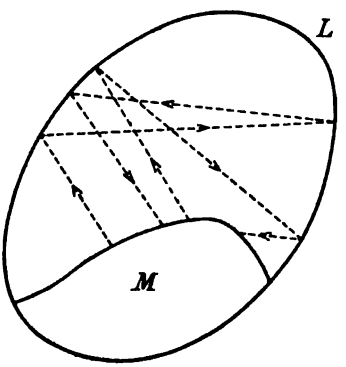


Fig. 5.

Avant d'aller plus loin, il faut encore noter une chose. C'est que l'état de rayonnement qui existe à l'intérieur de notre enceinte y pourrait également être excité, si les rayons ne provenaient pas des parois L elles-mêmes (*fig.* 5), mais d'un corps noir M placé quelque part dans l'espace intérieur à l'enceinte ; seulement, dans ce cas, il faudrait admettre que les parois elles-mêmes fussent parfaitement réfléchissantes. Alors, sans y ajouter de nouvelle énergie, elles ser-

viront à répandre le rayonnement dans tout l'espace intérieur ; chaque rayon parcourra cet espace jusqu'à ce qu'il rencontre le corps M lui-même, qui l'absorbera.

Enfin, et c'est le plus remarquable de tout, ce même état de rayonnement, caractérisé par la densité D de l'énergie, existera si le corps M n'est pas noir, mais quelconque, pourvu que, pour toutes les longueurs d'onde, il ait un certain pouvoir émissif, si petit qu'il soit. C'est une conséquence que Kirchhoff a déjà tirée de sa loi.

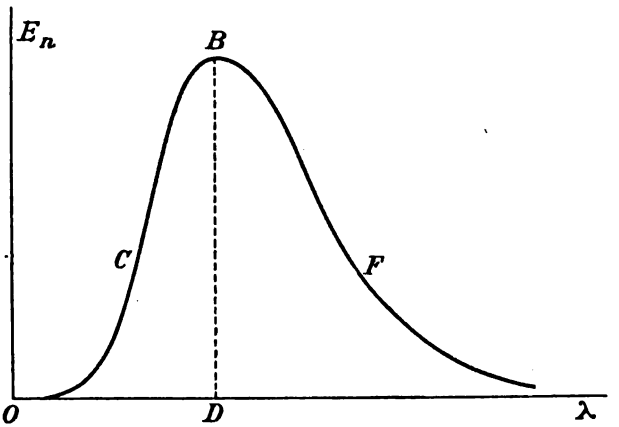


Fig. 6.

Pour chaque température T, on peut tracer une courbe qui représente E_n en fonction de la longueur d'onde, ou, comme on peut dire aussi, qui nous donne la distribution de l'énergie dans le spectre d'un corps noir. Comme l'énergie doit être très petite pour les deux extrémités du spectre, on peut présumer que la ligne aura une forme telle que vous le voyez dans la *fig.* 6. Du reste, c'est la forme qui a été trouvée expérimentalement ; j'oubliais encore de vous dire que, au point de vue expérimental, le problème a été complètement résolu.

Après cette introduction, nous pouvons maintenant en venir aux lois de Boltzmann et de Wien. Par un raisonnement thermodynamique assez subtil, le premier de ces physiciens [1] a reconnu que

[1] Boltzmann, *Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie* (*Ann. der Physik u. Chemie*, XXII, p. 291 ; 1884).

l'aire totale comprise entre la courbe et l'axe des λ, c'est-à-dire l'énergie totale émise par un corps noir, est proportionnelle à la quatrième puissance de la température.

Plus tard, M. Wien [1] a trouvé par des considérations non moins ingénieuses que, si l'on connaît la courbe pour une température T, on peut en déduire par une transformation bien simple celle qui correspond à une autre température T'. Il faut à cet effet changer toutes les abscisses dans le rapport de T' à T et toutes les ordonnées dans celui de T^5 à T'^5. On voit immédiatement que cela implique la loi de Boltzmann. Notons aussi que, d'après ce résultat de M. Wien, la longueur d'onde pour laquelle l'énergie est maxima et que je représenterai par λ_m (c'est la distance OD dans notre figure) doit être, comme toutes les abscisses, inversement proportionnelle à la température. Plus on élève la température, plus les petites longueurs d'onde se présenteront dans le rayonnement.

Je ne vous donnerai pas la preuve des deux lois, qui d'ailleurs ont été pleinement confirmées par les expériences. Je crois pouvoir dire que la preuve elle-même est à l'abri de toute objection et que tous les raisonnements qu'on a dû faire intervenir sont bien fondés.

On a utilisé par exemple dans cette démonstration un théorème, qu'on déduit de la théorie électromagnétique de la lumière, d'après lequel des rayons exercent une certaine pression sur les corps qu'ils frappent. De plus, dans les raisonnements de M. Wien, il est question de la modification qui est apportée à la longueur d'onde lorsque les rayons sont réfléchis par un miroir qui se trouve en mouvement. Cette modification est déterminée par le principe bien connu de Doppler. Or, personne ne voudra mettre en doute, ni ce principe, ni l'existence de la pression exercée par le rayonnement, qui d'ailleurs a été établie expérimentalement par M. Lebedew et par MM. Nichols et Hull.

Quelle est maintenant vis-à-vis de ces résultats la position de la théorie cinétique? Rien ne lui est plus facile que d'expliquer dans ses traits généraux l'émission et l'absorption de la lumière et de la chaleur. En effet, la dynamique des électrons nous apprend qu'une particule chargée devient le centre d'un rayonnement dès qu'elle

---

(1) W. Wien, *Sitzungsberichte der Akad. d. Wiss.*, Berlin, p. 55; 1893.

subit un changement de vitesse. Cela doit évidemment avoir lieu dans tout corps pondérable qui contient des électrons mobiles, soit que ces corpuscules exécutent des vibrations plus ou moins régulières, soit qu'ils se trouvent animés d'une agitation irrégulière, comparable à celle des molécules d'un corps chaud. D'un autre côté, les électrons peuvent être mis en mouvement ou leur mouvement peut être modifié par les forces électriques existant dans un faisceau de rayons qui les frappe ; ce faisceau leur cédera une certaine quantité d'énergie qui pourra alors prendre la forme que nous appelons chaleur. Voilà l'absorption.

Cependant, vous le comprenez déjà, on ne saurait en rester là, et la théorie cinétique doit s'imposer une tâche plus difficile. Il ne suffira même pas qu'elle nous montre le mécanisme qui est à la base des lois de Boltzmann et de Wien ; elle devra aussi nous faire connaître la forme de la fonction qui est représentée par notre figure, et la signification physique des deux paramètres qui déterminent les dimensions de la courbe pour une température donnée. On peut prendre pour ces paramètres, d'une part, l'aire totale, c'est-à-dire l'émission totale d'un corps noir, et, d'autre part, la longueur d'onde λ_m qui est représentée par OD, celle pour laquelle l'émission est la plus forte.

Ce qui rend cette question particulièrement intéressante, c'est que les deux paramètres doivent être indépendants des propriétés spéciales des corps. Choisissons un corps quelconque, un morceau de métal ou un cristal de quartz. Si nous en connaissions la structure et si nous pouvions avoir raison de toutes les difficultés mathématiques, nous serions en état de calculer l'émission E et l'absorption A pour une longueur d'onde et une température arbitrairement choisies. Les résultats dépendraient des propriétés du corps considéré ; ils ne seraient pas les mêmes pour le métal et pour le quartz. Pourtant les valeurs du rapport $\frac{E}{A}$ que nous trouverions pour les deux corps seraient les mêmes, nous n'en pouvons douter.

Or, comme l'une de ces valeurs est déterminée par les propriétés du métal et l'autre par celles du quartz, il faut nécessairement que ces deux substances différentes aient quelque chose de commun. Il appartient à la théorie cinétique de nous révéler en quoi consiste ce quelque chose.

Je dois mentionner ici une théorie du rayonnement très impor-

tante qu'on doit à M. Planck [1]. Ce savant a en effet trouvé pour la distribution de l'énergie dans le spectre d'un corps noir une formule qui s'accorde d'une manière satisfaisante avec les observations. Toutefois cette théorie sort trop du cadre de cette conférence pour que je puisse m'y arrêter.

La théorie cinétique n'a fait que le premier pas vers la solution de notre problème. En m'appuyant [2] sur les idées fondamentales de la théorie des électrons et sur les principes dont nous nous sommes déjà servis lorsque nous parlions de la thermo-électricité, j'ai calculé le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'une mince plaque de métal, en supposant la direction des rayons perpendiculaire à la plaque; mais je n'ai pu faire ces calculs que pour des longueurs d'onde très grandes. J'ai trouvé pour le pouvoir émissif :

$$E = \frac{4\pi c^2}{3\lambda^4} Ne^2 ul\Delta,$$

et pour le pouvoir absorbant :

$$A = \frac{\pi c}{\alpha T} Ne^2 ul\Delta.$$

Dans ces formules, e est la charge d'un électron exprimée en unités électromagnétiques, N le nombre des électrons par unité de volume, l la longueur moyenne de la distance sur laquelle ils se déplacent entre deux chocs successifs avec les atomes du métal, u la vitesse moyenne de leur mouvement calorifique, c la vitesse de la lumière dans l'éther et Δ l'épaisseur de la plaque. Comme dans nos formules précédentes, on a représenté par λ la longueur d'onde, par T la température absolue et par α la constante universelle que nous avons déjà rencontrée.

Or, si l'on divise la première expression par la seconde, les grandeurs N, l et Δ, qui varient d'une plaque de métal à l'autre, disparaissent, et on obtient pour le rapport $\frac{E}{A}$, qui doit être égal au

---

(1) Planck, *Ueber irreversible Strahlungsvorgänge* (*Ann. der Physik*, I, p. 69, 1900); — *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum* (*Ibid.*, IV, p. 553; 1901); — *Ueber die Elementarquanta der Materie und der Elektricität* (*Ibid.*, IV, p. 564; 1901).

(2) Lorentz, *On the emission and absorption by metals of rays of heat of great wave-lengths* (*Proceedings Acad. of Sc. Amsterdam*, p. 666; 1902-1903).

pouvoir émissif d'un corps noir, la valeur :

$$E_n = \frac{E}{A} = \frac{4}{3}\frac{c\alpha T}{\lambda^4}.$$

Elle est indépendante des propriétés spéciales d'un corps, comme la loi de Kirchhoff l'exige. En même temps nous avons trouvé la forme de la fonction E_n, mais il ne faut pas oublier que ce n'est que la partie extrême du côté droit de la courbe qu'on peut déterminer de cette manière.

Par une heureuse coïncidence, le résultat s'accorde avec la formule de M. Planck et aussi, ce qui mérite surtout l'attention, avec la loi de Wien. Si vous remplacez T par T′ et que vous multipliiez en même temps λ par $\frac{T}{T'}$, E_n sera multiplié par $\frac{T'^5}{T^5}$.

Une autre preuve qu'avec cette théorie et celle de Planck on se trouve dans la bonne voie, est fournie par la valeur de α qu'on peut en tirer lorsqu'on la compare avec les mesures de l'émission des corps noirs, ou plutôt par ce qu'on déduit de cette valeur. Le coefficient α étant déterminé, on connait en valeur absolue l'énergie cinétique qu'une molécule gazeuse possède en moyenne à une température donnée. Ensuite, puisque l'énergie totale des molécules d'un gaz peut être déduite de la pression, on peut calculer successivement le nombre des molécules et la masse de chacune d'elles, puis celle d'un atome d'hydrogène et des autres atomes, et enfin, en combinant les résultats avec l'équivalent électrochimique de l'hydrogène, la charge d'un ion de ce corps en unités absolues. D'après les idées modernes, la valeur de cette charge est en même temps celle de la charge d'un électron.

Je ne citerai pas tous les résultats de ces calculs qui ont été faits par M. Planck. Il suffira de mentionner qu'on trouve pour la masse d'un atome d'hydrogène :

$$1{,}3 \times 10^{-24} \text{ grammes,}$$

et pour la charge d'un ion de ce corps :

$$1{,}3 \times 10^{-20} \text{ unités électromagnétiques.}$$

On peut comparer le premier résultat au nombre donné par M. van der Waals en 1873, qui est 10^{-24}, et le second à la valeur qui

résulte des recherches de M. J.-J. Thomson sur la charge d'un ion gazeux. Dans ses dernières mesures de 1903, ce physicien a trouvé pour cette charge exprimée en unités électrostatiques $3,4 \times 10^{-10}$, soit $1,1 \times 10^{-20}$ unités électromagnétiques. Vous trouverez sans doute que l'accord est pleinement satisfaisant.

Malheureusement on ne peut pas dire dans cette théorie du rayonnement que ce n'est que le premier pas qui coûte. Ce qui reste à faire est beaucoup plus difficile. Il ressort de ce qui précède que l'énergie des molécules, représentée dans nos formules par la constante universelle α, détermine l'un des deux paramètres de notre courbe ; mais il m'a été impossible de découvrir ce qui détermine le second paramètre, la valeur de la longueur d'onde λ_m. Probablement elle dépendra des propriétés des électrons, et seront-ce après tout ces propriétés qui sont à la base de l'unité que présentent les corps les plus divers dans ces questions du rayonnement. Mais il faut avouer que nous n'en savons presque rien. Il est même impossible, à l'heure qu'il est, d'expliquer nettement pourquoi, en chauffant un corps, on déplace le rayonnement vers le côté des petites longueurs d'onde, ou, pour m'exprimer plus simplement, pourquoi les corps deviennent lumineux à une certaine température.

Je terminerai par une déduction théorique [1] qui me semble présenter quelque intérêt. Dans les cas, et il y en a grand nombre, où il est impossible d'approfondir entièrement le mécanisme des phénomènes, on peut souvent, pour trouver au moins quelque chose, tirer parti d'un artifice qui consiste dans la comparaison de deux systèmes « semblables » ; j'entends par là que les valeurs des grandeurs géométriques ou physiques dans le premier système ne se distinguent des valeurs correspondantes dans le second que par un facteur qui est le même pour les quantités de la même espèce, par exemple pour toutes les longueurs, pour toutes les vitesses, pour toutes les masses, etc., mais qui peut varier d'une espèce à l'autre.

En se servant de cette méthode, on peut démontrer le théorème suivant : si un corps pondérable M, ayant une température T et entouré de tous côtés de parois parfaitement réfléchissantes, produit dans l'éther à l'intérieur de ces parois un rayonnement dans lequel

---

[1] Lorentz, *The theory of radiation and the second law of thermodynamics* (*Proceedings Acad. of Sc. Amsterdam*, p. 436 ; 1900-1901).

la densité de l'énergie a une certaine valeur A, on peut toujours concevoir un deuxième corps M′ dont les molécules ont en moyenne la même force vive et qui, malgré cela, produit dans l'éther une densité de l'énergie qui n'est que la huitième partie de la densité A. Il suffit à cet effet de doubler toutes les dimensions linéaires, les diamètres des molécules, des atomes et des électrons, ainsi que leurs distances mutuelles, sans rien changer aux masses, en augmentant en même temps les charges électriques dans le rapport de 1 à $\sqrt{2}$.

Si l'on ne se soucie pas des électrons et des rayons qu'ils émettent, c'est-à-dire si l'on ne sort pas des théories moléculaires ordinaires, il n'y a aucune raison de croire que le second corps M′ ne pourrait pas exister. Mais, dans la théorie dont il s'agit actuellement, il n'en est plus ainsi ; il est impossible que les deux corps M et M′ aient à la fois une existence réelle.

Ces deux corps auraient en effet la même température, puisque l'énergie moyenne de leurs molécules est égale. Il y aurait donc contradiction entre la loi si solidement établie de Kirchhoff et ce fait que la densité de l'énergie dans l'éther serait différente dans les deux cas. Probablement, la raison pour laquelle M et M′ ne peuvent exister tous les deux doit être cherchée dans l'identité des électrons qui existent dans toute la matière pondérable qu'on truove dans la nature ; en détruisant cette identité, nous avons construit un corps fictif qui ne se trouve pas dans la nature et qui ne pourra jamais être réalisé.

La conclusion que nous avons tirée de la considération de systèmes semblables provoque une dernière remarque au sujet de la seconde loi de la thermodynamique. En étudiant les théories moléculaires ordinaires, nous avons eu l'impression que cette loi est applicable à tous les systèmes, sans aucune exception. Ensuite, dans notre discussion des phénomènes thermo-électriques, nous avons trouvé qu'elle peut être employée même dans un cas où on n'avait pas le droit de s'y attendre. Maintenant, au contraire, les phénomènes du rayonnement nous ont montré que le principe de Carnot-Clausius ne peut pas être vrai pour tous les systèmes imaginables ; il ne pourrait être maintenu si les deux corps que j'ai appelés M et M′ pouvaient exister à la fois.

En résumé, vous voyez qu'un examen un peu attentif des théories soulève bien des questions qui ont pour nous une grande importance, si nous désirons connaître le fond même des lois que nous appli-

quons et les limites de leur applicabilité. Espérons que le mathématicien qui répondra à ces questions ne se fera pas trop longtemps attendre.

Expériences de M. Cooper Hewitt sur les tubes à vide ;

Par M. Maurice Leblanc (1).

I. *Tubes à gaz raréfié de grande conductibilité.* — Si l'on veut faire passer un courant électrique dans un tube contenant un gaz raréfié, ce gaz se comporte comme un diélectrique parfait, tant que le champ électrique n'a pas atteint une valeur déterminée, dépendant de la pression et de la nature du gaz. Lorsqu'elle est atteinte, le gaz perd brusquement son pouvoir diélectrique et se comporte ensuite comme un conducteur, tant qu'il est traversé par un courant.

Pour le démontrer, M. Bouty place le tube contenant le gaz raréfié entre les plateaux d'un condensateur. Dès qu'un courant traverse le tube, la capacité du condensateur est augmentée comme si l'on avait rempli le tube d'un liquide conducteur.

On peut également se servir d'une ampoule munie de quatre électrodes, *a*, *b*, *c* et *d* : si un premier courant passe à travers deux d'entre elles, *a* et *b*, par exemple (Voir *fig.* 1), et si l'on ferme une pile P sur les deux autres, celle-ci débite un courant facile à mesurer avec un galvanomètre G, quand même le voltage de la pile ne serait que de 1 volt. Cet effet cesse instantanément dès que l'on interrompt le passage du premier courant.

M. Cooper Hewitt (2) a étudié les tubes à vide dès 1895 et a porté spécialement son attention sur les phénomènes qui se manifestent à la surface des électrodes. Il a découvert que la résistance offerte au passage d'un courant par un semblable tube, une fois détruite la cohésion diélectrique des gaz restants, ne devait être attribuée que

---

(1) Conférence faite le 29 avril 1905.

(2) Les renseignements suivants sur les recherches de M. Cooper Hewitt m'ont été fournis par son collaborateur, M. le Dr de Recklinghausen, qui a bien voulu m'assister lors de ma conférence à la Société de Physique, et qui a répété devant les assistants les expériences fondamentales auxquelles il a participé.

pour une très faible partie à la colonne gazeuse, et qu'elle résidait surtout à la surface de la cathode. Il a appelé ce phénomène *répugnance de la cathode.*

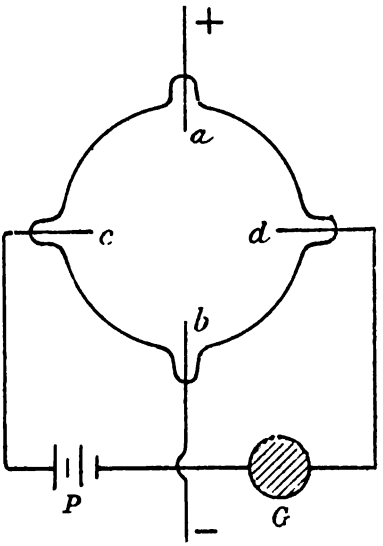


Fig. 1.

Il a découvert, en même temps, que, si la surface de la cathode était désagrégée par le passage du courant (mécaniquement, physiquement ou électriquement), elle perdait aussitôt sa répugnance et que l'on pouvait, alors, après un amorçage préalable, faire traverser un tube ou une ampoule à vide par un courant continu de grande intensité, en ne disposant que de quelques volts.

C'est ainsi qu'il a pu faire passer dans une ampoule de 20 centimètres de diamètre environ, refroidie par un bain d'huile, un courant de 100 ampères avec 8 volts.

Cette découverte a la plus haute importance au point de vue pratique, car elle permet d'utiliser industriellement les tubes à vide, que l'on pouvait croire confinés à jamais dans les laboratoires. Dès à présent, on a pu faire avec eux de nouveaux appareils d'éclairage intéressants à bien des points de vue, et une nouvelle soupape électrique avec laquelle on redresse, dans les meilleures conditions de rendement, des courants alternatifs de toutes fréquences, même égales à 10^8, résultat impossible à atteindre par tout autre moyen.

Nous signalerons encore un exploseur qui interrompt et rétablit un courant au moins 10^5 fois par seconde et, enfin, un interrupteur pour courants alternatifs, qui permet de les couper au moment précis où leur intensité est nulle.

Voici comment M. Cooper Hewitt a mis en évidence la propriété fondamentale de la cathode.

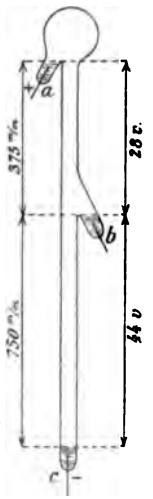


Fig. 2.

Il a pris un tube vertical, ayant 30 millimètres de diamètre intérieur, muni de trois électrodes, *a*, *b*, *c*, comme celui représenté sur la *fig.* 2. Chacune de ces électrodes était constituée par une petite poche remplie de mercure où pénétrait un fil de platine après avoir traversé le verre. La distance des électrodes *a* et *b* était de $37^{cm},5$ et celle des électrodes *b* et *c* de 75 centimètres.

Ce tube ayant été soigneusement vidé d'air, il l'a amorcé au moyen d'un des procédés décrits plus haut, et a fait passer un courant continu entre les électrodes *a* et *c*, la première servant d'anode et la seconde de cathode.

Avec 72 volts seulement, le courant a acquis une intensité de 3,5 ampères. Son passage maintenait la surface de la cathode à l'état de désagrégation. Son mercure s'évaporait, mais se condensait sur les parois du tube et retombait à la partie inférieure; la cathode se reconstituait ainsi au fur et à mesure de sa destruction.

Dans ces conditions, il a mesuré successivement les voltages développés entre les électrodes *a* et *b* et entre les électrodes *b* et *c*, et les a trouvés respectivement égaux à 28 et à 44 volts.

Le rapport de ces voltages est voisin de celui des distances des électrodes *a*, *b* et *b*, *c*. Mais il en diffère, car il y a encore une chute brusque de voltage à la surface de chaque électrode. Ces chutes de voltage sont d'ailleurs peu importantes, et leur somme est rarement supérieure à 14 volts.

Il a réuni alors les électrodes *b* et *c* par un circuit renfermant un galvanomètre et constaté le passage d'un courant de 1 à 2 centièmes d'ampère, ayant une intensité du même ordre de grandeur que celle du courant qu'eût fait passer le même voltage entre les électrodes *c* et *d* de l'ampoule de la *fig.* 1, lorsqu'un premier courant eut passé entre les deux autres. La presque totalité du courant continuait à passer entre les électrodes *a* et *c*.

Il a ensuite réuni l'électrode *b* à l'anode *a*. Aussitôt l'entrée du courant a sauté de l'anode *a* à la nouvelle anode *b*.

En intercalant, entre la source d'électricité et les anodes *a* et *b*, deux rhéostats à résistances variables, il a pu partager le courant entre les deux anodes, dans une proportion quelconque ; la portion du tube comprise entre les électrodes *a* et *b* se comportait comme une simple résistance.

Cette expérience démontre péremptoirement qu'une électrode en mercure n'offre que très peu de résistance au passage du courant lorsqu'elle sert d'anode, et qu'elle lui en oppose, au contraire, une très considérable lorsqu'elle sert de cathode, si sa surface ne se trouve pas maintenue à l'état de désagrégation continuelle par le passage d'un courant suffisamment intense, préalablement établi.

M. Cooper Hewitt a repris la même expérience en remplaçant le mercure par d'autres corps. Il a toujours obtenu les mêmes résultats ; mais l'intensité du courant qui doit traverser la cathode *c* est d'autant plus grande qu'il s'agit de corps plus difficiles à désagréger d'une manière quelconque.

La *répugnance de la cathode* est donc une propriété générale : on peut toujours la surmonter, en désagrégeant sa surface.

Le graphite est facile à désagréger : il se transforme en poussière. Il en est de même pour le potassium et le radium; mais leurs vapeurs attaquent rapidement le verre du tube. Quant aux sels,

leur dissociation amène la production de vapeurs acides, qui attaquent l'anode.

Pratiquement, le mercure à l'état de pureté permet seul de constituer une cathode dont on puisse maintenir constamment la surface à l'état de désagrégation et qui se reconstitue d'elle-même, au fur et à mesure de sa destruction. Les vapeurs de mercure n'exercent aucune action nocive sur les parois du tube ou sur l'anode, si elle est en fer comme celles qu'emploie M. Cooper Hewitt.

On peut donc constituer un tube à vide offrant une grande conductibilité au passage d'un courant continu, une fois qu'il a été amorcé, à la condition de lui donner une cathode en mercure et de le faire toujours traverser par un courant continu d'intensité suffisante pour que la surface de la cathode soit maintenue à l'état de désagrégation. L'anode peut être en mercure, en fer ou tout autre métal non attaquable par les vapeurs de mercure.

D'ordinaire, l'anode s'échauffe davantage que la cathode. Si on la fait en mercure, il y a un transport de métal de l'anode à la cathode, opéré par voie de distillation.

II. *Amorçage.* — Tout tube à vide et à cathode de mercure doit être préalablement amorcé, c'est-à-dire que la cohésion diélectrique des gaz restants doit être détruite une fois pour toutes avant que l'on puisse lui faire produire un effet utile.

Un premier moyen consiste à lui faire supporter, pendant un temps court, un voltage suffisant développé par une source d'électricité capable de lui fournir, en même temps, un courant d'intensité assez grande pour amener la désagrégation immédiate de la surface de la cathode.

Cette source doit pouvoir fournir un grand débit d'énergie, mais seulement pendant un temps très court. Il était tout indiqué de la constituer avec une bobine de self-induction, qui restituerait brusquement l'énergie qu'elle aurait emmagasinée pendant un temps quelconque.

Aussi M. Cooper Hewitt a-t-il eu recours au dispositif suivant (Voir *fig.* 3).

Soit A le tube que l'on veut amorcer, *a* son anode en fer, et *c* sa cathode de mercure.

On relie l'anode au pôle + de la source d'électricité par l'intermédiaire d'une résistance R et d'une bobine de self-induction J.

D'autre part, la cathode étant reliée au pôle — de la source, on

établit une connexion, entre l'anode et la cathode, renfermant un interrupteur à huile et à action rapide U et une résistance R'.

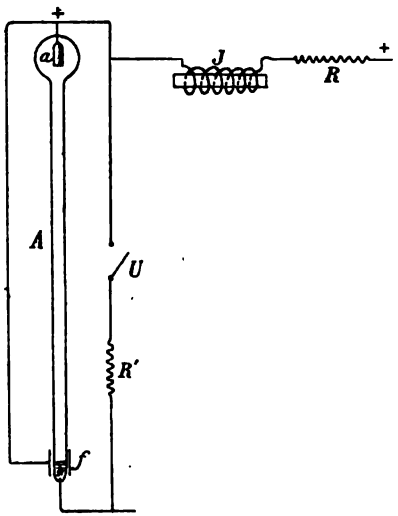


Fig. 3.

Enfin, autour du tube et dans le voisinage immédiat de la cathode, on dispose une feuille d'étain *f*, que l'on relie à l'anode. On fait ainsi un petit condensateur, dont les armatures sont fournies par la feuille d'étain et le mercure de la cathode, et qui est monté en dérivation entre les bornes de l'interrupteur. Quand on ouvrira celui-ci, l'extra-courant de rupture ira d'abord charger ce condensateur, au lieu de se frayer un passage à travers l'huile, ce qui augmentera la rapidité de l'action de l'interrupteur, comme dans les bobines de Ruhmkorf.

Mais cette disposition a une efficacité toute spéciale dans le cas actuel. En effet, la charge du condensateur amène une variation brusque de la tension superficielle du mercure de la cathode. Il en résulte une violente agitation de cette surface, qui est ainsi désagrégée, au moment même où la cohésion diélectrique du gaz est détruite.

L'expérience montre que la quantité d'énergie qu'il faut emmagasiner dans la bobine de self-induction J, pour déterminer l'amorçage, doit être environ 5 fois plus grande lorsque ce condensateur est supprimé que lorsqu'il est rétabli.

Pour amorcer le tube, on ferme l'interrupteur U. Un courant d'intensité constante finit par le traverser, après avoir emmagasiné une certaine quantité d'énergie dans la bobine de self-induction J. On ouvre alors l'interrupteur, ce qui provoque un coup de bélier. Le voltage s'élève entre l'électrode et la cathode, jusqu'à ce qu'un courant d'intensité constante le traverse désormais. La résistance R sert à régler son intensité. La résistance R' sert à régler l'intensité du courant dans la bobine, avant la mise en route, et, par suite, la quantité d'énergie disponible pour l'amorçage.

Le voltage nécessaire est proportionnel à la longueur du tube A, mais croît très rapidement avec le degré de raréfaction des gaz, en tendant vers l'infini lorsque le vide devient absolu.

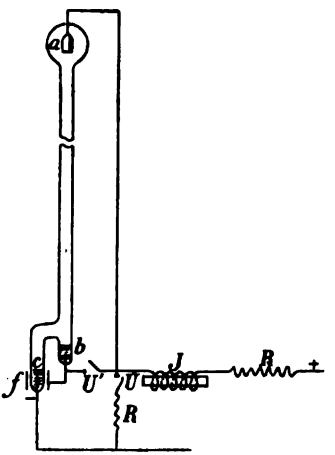


Fig. 4.

Pour éviter d'avoir à produire des voltages démesurés, M. Cooper Hewitt a fait des tubes ayant deux anodes, *a* et *b*, et une cathode, *c*, comme celui représenté sur la *fig.* 4.

L'anode *b* est située aussi près que possible de la cathode *c*. On relie les anodes *a* et *b* par un circuit contenant un interrupteur U'. Cet interrupteur étant fermé, on détermine, comme précédemment, l'amorçage entre l'anode *b* et la cathode *c*. Le tube devient conducteur sur toute sa longueur et une partie du courant passe par l'anode *a*. Dans ces conditions, pendant l'amorçage, on n'a à surmonter que la cohésion diélectrique de la colonne comprise entre les

électrodes *b* et *c*, au lieu de celle de la colonne comprise entre les électrodes *a* et *c*.

Néanmoins, lorsque la raréfaction des gaz devient extrême et que, la lampe étant froide, la tension des vapeurs de mercure émises par la cathode est sensiblement nulle, le voltage nécessaire pour déterminer l'amorçage est encore énorme. Il faut alors avoir recours à la méthode suivante, connue d'ailleurs depuis longtemps :

On incline le tube de façon qu'un mince filet de mercure vienne joindre l'anode à la cathode et établisse un court-circuit. Le courant passe : dès qu'on redresse le tube, le court-circuit est interrompu, un arc jaillit à l'intérieur du tube et détermine son amorçage immédiat.

III. *Stabilité du fonctionnement.* — Si l'intensité du courant devient trop faible pour entretenir l'état de désagrégation de la cathode, elle reprend immédiatement sa répugnance.

Or, les expériences de MM. Wiedemann, Ruhlmann et Cantor ont montré qu'un courant traversant un gaz raréfié, lorsqu'il est fourni par une source à voltage constant, est toujours discontinu.

Il était donc nécessaire de le forcer à demeurer continu en faisant croître automatiquement le voltage aux bornes du tube, lorsque l'intensité diminuait, et réciproquement. M. Cooper Hewitt y est arrivé en montant en série, avec chacun de ses tubes, une résistance ou une bobine de self-induction.

Au contraire, on rend impossible le fonctionnement d'un tube raréfié si l'on dispose un condensateur de capacité appréciable entre ses bornes.

M. Robert de Valbreuze, qui a fait, il y a deux ans, d'intéressantes recherches sur les tubes à vide, a reconnu, de son côté, la grande efficacité des bobines de self-induction pour les maintenir amorcés. Elles ont l'avantage de ne pas dépenser d'énergie.

Toutefois, pour des raisons qui seront exposées plus loin, M. Cooper Hewitt joint à leur action celle d'une résistance ohmique.

IV. *Étude spéciale de la conductibilité des tubes à vide et à cathode de mercure.* — M. Cooper Hewitt, avec l'aide de M. Wills, a fait de nombreuses expériences sur la conductibilité de ces tubes. Il a d'abord étudié comment variait le voltage à l'intérieur d'un tube à vide, à cathode de mercure, à la surface des électrodes et le long de la colonne gazeuse.

Un premier point était déjà acquis : la présence de gaz raréfiés à

l'intérieur du tube ne pouvait produire qu'un accroissement de résistance après l'amorçage. Aussi les expériences n'ont-elles porté que sur des tubes où le vide avait été porté aussi loin que possible, et qui ne renfermaient plus que la vapeur de mercure émise par la cathode.

M. Cooper Hewitt avait aussi constaté que la chute de voltage, à la surface des électrodes, était presque indépendante de l'intensité du courant, qu'elle ne dépendait guère que de la température de ces surfaces et diminuait lorsque celle-ci augmentait.

Ils ont opéré sur des tubes à anode de fer. Une pince thermo-électrique, traversant le verre, passait à 1 centimètre environ de l'anode, et un électromètre mesurait la chute de voltage entre l'anode et la vapeur située dans son voisinage immédiat.

On se servait d'un électromètre pour éviter l'action de la cathode sur le courant qui aurait dû traverser un voltmètre.

M. Wills a, en particulier, relevé sur un tube de 19 millimètres de diamètre .les nombres suivants, qu'il a publiés en août 1904 dans l'*Electrical Review* :

Intensité du courant en ampères	Chute de voltage à la surface de l'anode en volts	Température de l'anode
1,25	6,25	123° C.
1,75	5,8	143
2,25	5,4	172
2,75	5,1	200
3,25	4,6	243

Il est impossible de faire la même expérience avec la cathode, à cause de l'état d'agitation continuel de sa surface. Mais, en opérant sur des ampoules de grande section dont l'anode et la cathode étaient très voisines, et où la chute de voltage dans le milieu intermédiaire était négligeable, il était possible, en connaissant la chute de voltage totale entre les deux électrodes et la chute de voltage à l'anode, d'en déduire, par simple différence, la chute de voltage à la cathode.

On a trouvé, ainsi, que cette dernière chute était très sensiblement constante et égale à 5 volts.

MM. Cooper Hewitt et Wills ont ensuite recherché comment variait le voltage à l'intérieur d'un tube, en fonction de son diamètre, de la tension de vapeur de mercure qui y régnait et de l'intensité du courant qui le traversait.

Pour cela, ils ont pris des tubes de diamètres différents (Voir *fig.* 5) dans lesquels pénétraient : 1° une pince thermo-électrique C et une

pointe de platine D situées à une distance déterminée l'une de l'autre. La pince thermo-électrique C actionnait un galvanomètre B, dont la déviation donnait la température à l'intérieur du tube. On en déduisait la tension de vapeur du mercure au moyen des tables de lord Rayleigh. Un électromètre E mesurait le voltage entre les points C et D. On faisait varier la température de la lampe en la réchauffant extérieurement, et un ampèremètre F mesurait l'intensité du courant qui la traversait.

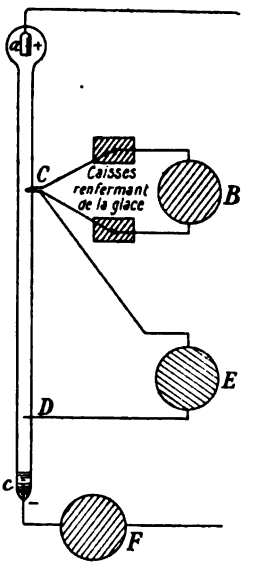


Fig. 5.

La colonne lumineuse ne remplit pas toujours complètement le tube. Elle cesse de le faire dès que la tension de vapeur a acquis une valeur déterminée. A partir de ce moment, son diamètre augmente avec l'intensité du courant et diminue lorsque la tension de la vapeur augmente.

Les diagrammes de la *fig.* 6 représentent les résultats observés sur un tube de 38 millimètres de diamètre. Ils montrent comment varie, pour ce tube, la chute de voltage par centimètre en fonction de la tension de vapeur et de l'intensité du courant.

Ils se composent chacun de deux droites se coupant sous un angle obtus. La tension de vapeur Δ_q, au point d'intersection de

ces deux droites, est approximativement donnée par l'expression :

$$\Delta_q = \frac{\sqrt[4]{J}}{\sqrt{D}},$$

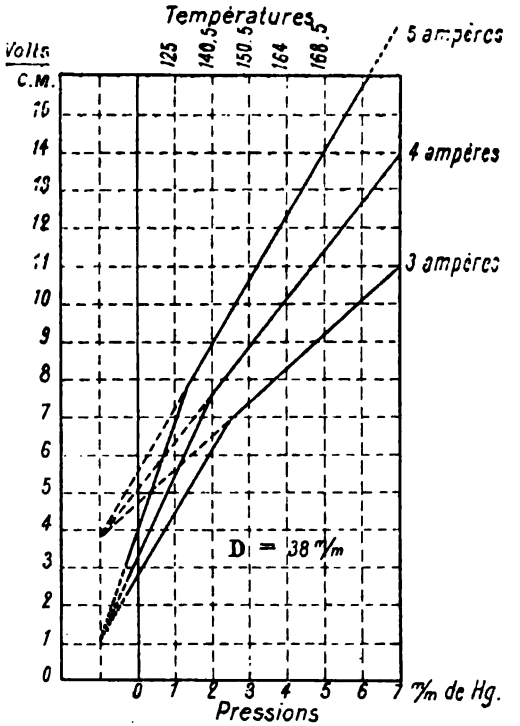


Fig. 6.

où J représente l'intensité, exprimée en ampères, du courant qui traverse le tube, et D le diamètre de ce dernier, exprimé en centimètres.

La discontinuité du phénomène s'explique aisément parce que, tant que l'on a $\Delta < \Delta_q$, la colonne lumineuse occupe toute la section du tube et que, pour $\Delta > \Delta_q$, elle n'en occupe qu'une partie.

Il est à remarquer que, pour un même tube, les droites appartenant à chacun des deux groupes de droites composant les diagrammes relatifs à des intensités différentes convergent en un même point, et que les deux points de convergence ont même abscisse.

Pour des tubes plus étroits, on trouve des diagrammes composés

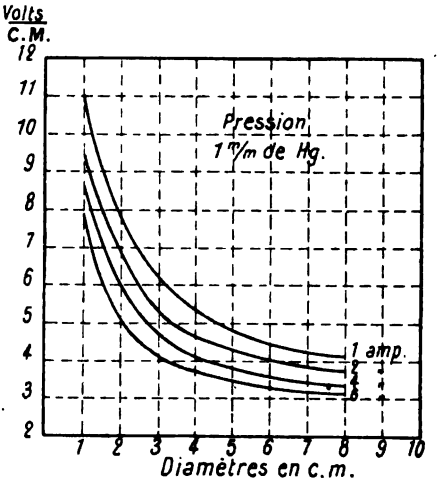


Fig. 7.

de droites semblables, mais qui se relèvent plus rapidement.

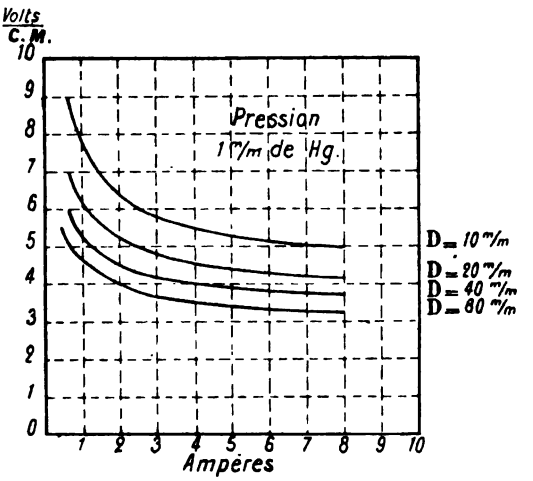


Fig. 8.

M. Wills a pu représenter les résultats observés par la formule suivante, où X désigne la différence de potentiel nécessaire pour

faire traverser par un courant de J ampères 1 centimètre de longueur d'un tube de D centimètres de diamètre, la tension de vapeur étant de Δ millimètres de mercure. Dans cette formule, a, b, c et d représentent des constantes :

$$X = a\left[b + \frac{1}{\sqrt{J}}\right]\left[c + \frac{1}{\sqrt{D}}\right]\left[\Delta + \frac{2}{D} + \frac{1}{\sqrt{D}}\right] + d.$$

On a pour :

$\Delta < \Delta_1$	$\Delta > \Delta_1$
$a = 0{,}545$	$a = 0{,}150$
$b = 0{,}775$	$b = 0{,}398$
$c = 1{,}71$	$c = 0{,}122$
$d = 0{,}100$	$d = 0{,}370$

Cette formule montre que le voltage X est une fonction linéaire de la tension de vapeur Δ. Un tube conduit donc d'autant mieux que le vide y est plus grand.

Les *fig.* 7 et 8 se rapportent au cas où la pression dans le tube est maintenue constante et égale à 1 millimètre de mercure.

La première montre comment varie le voltage par centimètre, lorsque l'intensité du courant augmente, dans des tubes de diamètres différents. La seconde montre comment varie le même voltage, avec le diamètre du tube, pour des courants de diverses intensités.

Les diagrammes des *fig.* 6, 7 et 8 sont des illustrations de la formule de M. Wills.

V. *Influence d'un champ magnétique sur un tube à vide et à cathode de mercure.* — M. Hewitt a eu l'idée d'approcher un aimant d'un tube à vide et à cathode de mercure traversé par un courant. Il a constaté qu'une flamme, dirigée suivant les lignes de force, émanait alors de la tache brillante constituant la zone de désagrégation de la cathode et venait s'écraser contre les parois du tube, en un point où se manifestait un vif dégagement de chaleur.

Un phénomène très curieux s'est manifesté : la colonne lumineuse, qui continuait à aller de l'anode à la cathode, contournait cette flamme, en affectant la forme d'une hélice.

VI. *Première application des tubes à vide à cathode de mercure.* — *Lampes dites à vapeur de mercure.* — Le voltage nécessaire pour faire passer un courant dans un tube à vide, dont la cathode est en mercure, est d'autant plus petit, après l'amorçage, que la raréfac-

tion du gaz a été poussée plus loin. Lorsqu'elle est extrême et que le tube est refroidi de manière que la vapeur de mercure émise par la cathode se condense immédiatement et ne vienne pas remplir le tube, le passage d'un courant de plus de 100 ampères ne se manifeste que par l'apparition d'une tache brillante à la surface de la cathode, à l'endroit où cette surface est désagrégée. La colonne gazeuse demeure obscure.

Si la raréfaction est poussée moins loin, le tube étant toujours refroidi, la résistance est plus grande, mais le tube s'illumine, et sa couleur est caractéristique du gaz qu'il contient encore : rose si c'est de l'azote, violette si c'est de l'hydrogène...

Un tube où le vide a été poussé aussi loin que possible s'illumine aussi dès que l'on cesse de le refroidir et qu'il est envahi par la vapeur de mercure, et la lumière émise a la couleur verte du mercure.

On conçoit la possibilité d'user de semblables tubes comme appareils d'éclairage.

M. le Dr de Recklinghausen a fait les expériences suivantes : un tube à cathode de mercure primitivement rempli d'azote était plongé dans de la glace, il paraissait rose; dès qu'on enlevait la glace, il était envahi par la vapeur de mercure et devenait vert. L'un des spectres de l'azote ou du mercure était toujours prépondérant. Il a substitué à l'azote divers gaz parmi ceux qui ne pouvaient attaquer les électrodes, en particulier l'argon et l'hélium. Le résultat a toujours été le même. Il semble donc que le courant demande de le transporter, suivant les cas, de préférence aux ions de l'un ou l'autre des gaz ou vapeurs qui remplissent le tube, au lieu de le demander à plusieurs d'entre eux à la fois.

Il a ensuite remplacé le mercure par un amalgame de potassium. Dans un tube vertical, long de 1 mètre, la partie supérieure devenait rouge, et la partie inférieure verte, le changement de couleur se produisant sur une longueur de 2 centimètres environ. Quoi que l'on fasse, il est impossible de superposer pratiquement les spectres de corps différents dans ces tubes.

Comme on ne saurait maintenir une lampe électrique dans de la glace, si l'on veut employer des tubes à gaz raréfié et à cathode de mercure comme appareils d'éclairage, on doit accepter une lumière verte correspondant au spectre du mercure.

Elle a le grand défaut de dénaturer complètement les couleurs et

de donner un aspect cadavérique aux personnes ; mais elle est très reposante pour la vue et est très économique.

Les lampes normales de M. Cooper Hewitt ne consomment, en effet, que 0,45 watt par bougie en tenant compte de la perte d'énergie dans les résistances inductives qui les accompagnent. Toutefois, si l'on consent une perte de 25 0/0 dans la lumière produite, on peut la mélanger de rayons rouges, en enveloppant les lampes avec une étoffe de soie imprégnée d'une substance fluorescente, telle que la rhodamine. Dans ces conditions, les personnes recouvrent leur aspect naturel.

La lampe à vapeur de mercure, telle qu'elle est, peut rendre bien des services, quand des questions d'esthétique ne sont pas en jeu. Elle convient admirablement à l'éclairage des ateliers et des bureaux de dessin.

La nocivité des rayons rouges, au point de vue physiologique et psychologique, est bien connue. Les ateliers de MM. Lumière, à Lyon, étaient primitivement éclairés à la lumière rouge, et leur personnel, composé d'hommes et de femmes, était, paraît-il, ingouvernable. Ils ont trouvé une couleur verte non photogénique : ils l'ont substituée au rouge et, depuis ce temps, le calme le plus absolu règne dans leur établissement.

La lumière des lampes à vapeur de mercure possède les mêmes qualités calmantes, tout en étant très photogénique : elle convient admirablement pour la photographie.

Les tubes de verre arrêtent les rayons ultra-violets ; mais des artistes spéciaux ont réussi dernièrement à faire des lampes à vapeur de mercure en quartz, bien que sa température de fusion soit de 800° supérieure à celle du verre. Ces lampes fournissent tellement de rayons ultra-violets que l'on ne saurait les regarder longtemps sans danger pour les yeux ; mais elles ont des usages médicaux et peuvent servir au traitement du lupus.

A égalité d'intensité de courant, la luminosité d'un tube augmente avec la tension de la vapeur de mercure qui le remplit, mais le voltage nécessaire pour faire passer le courant augmente plus rapidement avec cette tension, à partir d'une certaine limite. Il y a donc une tension de vapeur pour laquelle le rendement lumineux est maximum. Elle est voisine de 2 millimètres de mercure et correspond à la température de 145°.

Le problème revenait à dimensionner la lampe, de manière que

sa température intérieure se maintînt d'elle-même aux environs de 145°. La température de nos habitations étant toujours voisine de 20°, il suffisait de régler convenablement sa surface de refroidissement.

M. Cooper Hewitt y est parvenu en disposant, autour de la cathode, une chambre de condensation de diamètre beaucoup plus grand que celui du tube, comme le montre la *fig.* 9. C'est contre les parois de cette chambre que se condense la majeure partie des vapeurs issues de la cathode, et c'est à travers elle que se dissipe presque toute la chaleur.

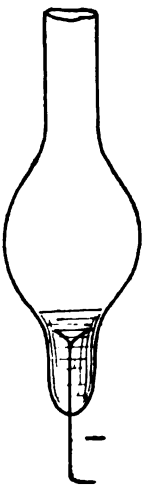


Fig. 9.

On a soin de disposer du coton de verre au fond des tubes pour amortir les coups de marteau du mercure, si le tube venait à être culbuté. On peut arriver au même résultat en reliant les fils de platine qui traversent le verre à des coupelles en acier.

Ces dispositions paraissent avoir une très grande importance en pratique.

Toutes les lampes sont faites pour une intensité de 3,5 ampères. Ce chiffre ne saurait être dépassé sans qu'il fallût prendre des dispositions assez coûteuses pour assurer le passage du courant au travers des fils traversant le verre.

Avec une intensité plus faible, un courant d'air pourrait éteindre la lampe, en refroidissant par trop sa cathode.

Le diamètre du tube a été déterminé par les considérations suivantes :

Faisons fonctionner une lampe dans une atmosphère à la température de 20° C. environ, et faisons-la traverser par des courants d'intensités successivement croissantes. Le voltage qu'il faudra développer entre ses bornes variera, en fonction de l'intensité, comme le représente la courbe de la *fig.* 10.

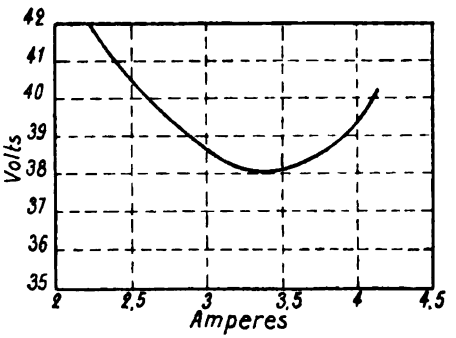


Fig. 10.

Il passera par un minimum qui, toutes choses égales d'ailleurs, sera fonction du diamètre du tube.

On fera varier la surface de la chambre de condensation, de manière que la tension de vapeur soit à peu près de 2 millimètres de mercure, lorsque l'intensité sera de 3,5 ampères. Mais, pour que le régime de la lampe soit stable, le voltage nécessaire aux bornes de la lampe devra passer par un minimum, précisément pour cette intensité.

S'il en est ainsi, il suffira de monter une résistance en série avec la lampe, comme s'il s'agissait d'une lampe à arc, pour qu'un accroissement d'intensité amène une diminution de voltage et, par suite, tende à ramener l'intensité à sa valeur normale et réciproquement.

Le fonctionnement de la lampe sera alors parfaitement stable.

Il faut donc déterminer le diamètre du tube, de manière que la courbe de la *fig.* 10 passe par un minimum, lorsque l'intensité du courant est de 3,5 ampères. Cette courbe se rapporte à une

lampe destinée à fonctionner sous un voltage de 40 volts. Le résultat voulu est obtenu avec une grande approximation ; mais on perd, dans la résistance, un grand nombre des volts disponibles, soit 22.

Cela n'empêche pas le rendement industriel de cette lampe d'être très élevé, la consommation totale d'énergie n'étant que de 0,45 watt par bougie.

Afin de donner au fonctionnement de ses lampes la stabilité nécessaire, M. Cooper Hewitt les a accompagnées simultanément d'une résistance et d'une bobine de self-induction.

La self-induction sert à empêcher les variations brusques de courant qui tendent toujours à se produire dans les tubes à vide. La résistance sert à maintenir à la valeur voulue l'intensité normale du courant qui traverse la lampe.

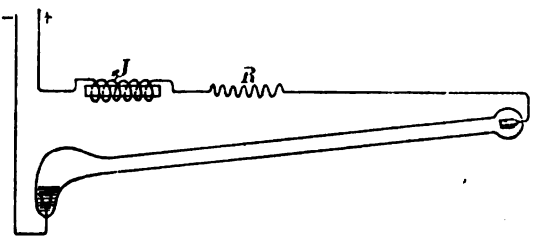


Fig. 11.

L'une de ces lampes est schématiquement représentée sur la *fig.* 11. On les amorce en les inclinant et en établissant ainsi un court-circuit momentané entre l'anode et la cathode.

VII. *Deuxième application des tubes à vide et à cathode de mercure. — Soupape électrique.* — Une cathode ne peut laisser passer un courant que si sa surface a été préalablement désagrégée. Cette propriété permet de réaliser une soupape électrique, c'est-à-dire un circuit à travers lequel une force électromotrice alternative ne peut faire passer que des courants d'un sens déterminé.

Considérons, par exemple, la disposition suivante (Voir *fig.* 12).

Une ampoule A est munie d'une cathode *c* en mercure et de deux anodes *a* et *b* en fer, mais qui pourraient aussi être en mercure.

Faisons passer un courant continu entre l'anode *b* et la cathode *c*, par les procédés ordinaires. Ce courant sera fourni par une petite batterie B qui n'aura à développer que 14 volts entre les

électrodes *b* et *c* et produira seulement un courant d'intensité suffisante, soit 3,5 ampères, pour maintenir la surface de la cathode *c* à l'état de désagrégation.

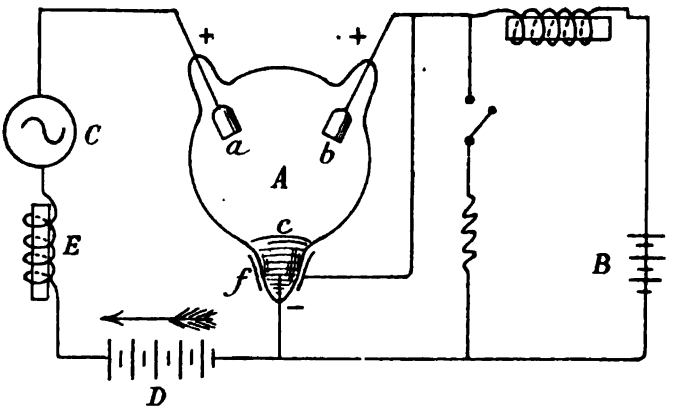


Fig. 12.

Faisons agir en même temps une source de force électromotrice alternative C entre les électrodes *a* et *c*.

Lorsque le courant tendra à aller de l'électrode *a* à la cathode *c*, il n'aura à subir qu'une chute de voltage de 14 volts. Il passera donc, si la source C développe un voltage supérieur.

S'il tend, au contraire, à aller de *c* en *a*, l'électrode *a* jouera le rôle de cathode. Sa répugnance n'étant pas détruite par une désagrégation superficielle préalable, elle s'opposera au passage du courant.

Le circuit comprenant la source de force électromotrice E sera le siège d'un courant toujours de même sens, qui pourra charger une batterie d'accumulateurs D, développant une force contre-électromotrice bien supérieure à la force électromotrice de la batterie B. En même temps, l'intensité du courant, qui la chargera, pourra être bien plus grande que 3,5 ampères.

Enfin, si nous intercalons une bobine de self-induction E dans ce circuit, nous pourrons rendre très sensiblement continue l'intensité du courant.

Cet appareil permet donc de faire produire un courant continu par un alternateur. Mais l'alternateur ne travaille alors que pendant la moitié du temps. On évite cet inconvénient comme il suit :

Un alternateur (Voir *fig.* 13) alimente le circuit primaire P d'un transformateur muni de deux circuits secondaires S_1 et S_2 ayant le même nombre de spires du même fil, mais enroulés l'un à gauche, l'autre à droite.

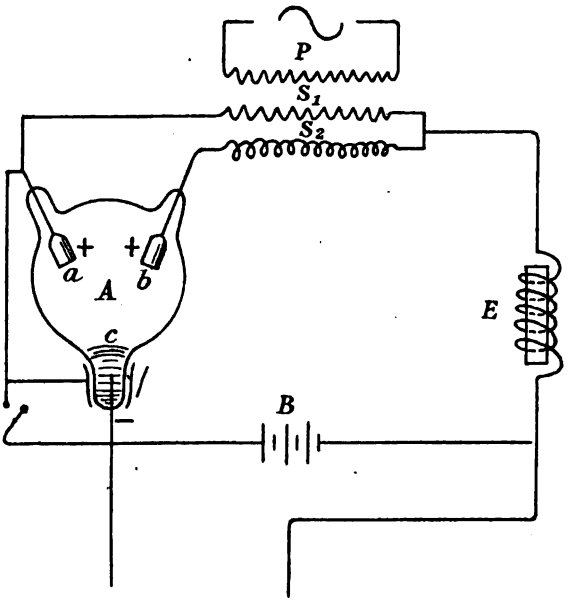


Fig. 13.

Les points d'entrée de ces circuits sont individuellement reliés aux deux anodes *a* et *b* de l'ampoule A. Leurs points de sortie sont réunis et servent de point de départ au circuit extérieur, que l'on veut faire traverser par un courant continu. Ce circuit aboutit à la cathode *c*. Il doit contenir une bobine de self-induction E.

On monte en dérivation, entre les conducteurs d'aller et de retour de ce circuit, une batterie d'accumulateurs B qui sert à amorcer l'ampoule. De cette manière, l'alternateur débite un courant alternatif, et rien n'est changé à son fonctionnement. Le courant secondaire traverse successivement l'un et l'autre des circuits secondaires.

Une fois l'appareil mis en route, on peut supprimer la batterie B, la bobine de self-induction E suffisant pour empêcher le courant de s'annuler avec la force électromotrice développée dans les circuits secondaires.

Lorsqu'il s'agit de redresser des courants triphasés, M. Cooper Hewitt emploie une ampoule A qui a trois anodes a_1, a_2, a_3 et une cathode de mercure c (Voir *fig.* 14). Le transformateur a ses circuits secondaires montés en étoile. Leurs trois points d'entrée sont individuellement reliés aux anodes a_1, a_2, a_3. Le circuit à courant continu est branché entre le point neutre O et la cathode c. Une batterie d'accumulateurs B sert à opérer l'amorçage de l'ampoule, comme dans les cas précédents.

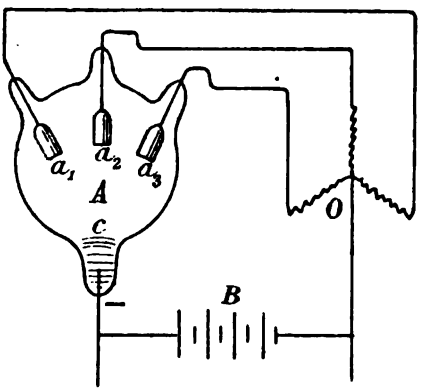


Fig. 14.

Ici, il n'est plus besoin d'une bobine de self-induction pour maintenir l'appareil amorcé, une fois que la batterie a été supprimée. En effet, les courants débités par les trois circuits du transformateur ne s'annulent jamais simultanément ; d'autre part, la self-induction des circuits d'armature de l'alternateur suffit pour empêcher toute variation brusque de l'intensité des courants.

M. Cooper Hewitt a fait des redresseurs de ce système capables de débiter un courant continu de 30 ampères sous 500 volts et dont le rendement s'élève à 98 0/0. Tout fait espérer que ces résultats seront de beaucoup dépassés dans l'avenir, lorsqu'on aura définitivement réussi à remplacer les ampoules en verre par des ampoules métalliques.

Les services que rendront ces appareils, lorsqu'ils seront devenus tout à fait industriels, seront immenses.

Ils permettent, en effet, de redresser des courants ayant la fréquence de ceux de Hertz, c'est-à-dire de courants capables de

transmettre de l'énergie à distance, par induction, à travers l'air. Il serait donc possible de transmettre de l'énergie sans fil, au lieu de transmettre seulement des messages. En supposant que cela ne puisse se faire qu'à petite distance, il serait déjà fort intéressant de pouvoir transmettre de l'énergie à des voitures automobiles, au moyen d'une simple ligne parallèle à la route, par induction et sans aucun contact direct.

Ces appareils permettraient enfin de redresser des courants alternatifs, sans se servir de collecteur, ce qui constituerait un grand progrès pour l'industrie électrique.

VIII. *Troisième application des tubes à vide et à cathode de mercure. — Exploseurs.* — Pour produire des courants de haute fréquence, on ne peut se servir d'alternateurs, et l'on doit avoir recours aux phénomènes de décharge oscillante.

Il y a alors le plus grand intérêt, surtout si l'on veut mettre à profit les phénomènes de résonance électrique, à restituer au condenseur qui se décharge, au bout de chaque demi-période du courant, l'énergie qu'il vient de fournir. En opérant ainsi, on peut obtenir des courants dont l'intensité efficace soit toujours constante, et dont les variations d'intensité, pendant la durée de chaque demi-période, suivent très sensiblement la loi sinusoïdale.

Que faut-il pour cela ? un exploseur doué des propriétés suivantes :

1° Un arc ne pourra jaillir entre ses électrodes que lorsqu'un voltage élevé et toujours le même aura été développé entre elles. Le condensateur branché entre ces électrodes aura alors une charge élevée et bien déterminée chaque fois que l'arc jaillira;

2° Aussitôt l'arc éclaté. le voltage qu'aura à surmonter le courant pour passer devra être aussi petit que possible et très faible par rapport à celui qui aura déterminé l'amorçage;

3° L'exploseur devra se désamorcer instantanément, lorsque l'intensité du courant qui le traversera passera par zéro.

M. Cooper Hewitt a réalisé un semblable exploseur de la manière la plus simple. Il se compose d'une ampoule A munie de deux électrodes en mercure P et Q (Voir *fig.* 15).

Le voltage nécessaire pour faire jaillir un arc entre ces électrodes est d'autant plus grand que le vide a été poussé plus loin dans l'ampoule. Il est facile de le rendre égal à 10 000 ou 20 000 volts. Si l'appareil est refroidi par un bain d'huile, de manière que les

vapeurs de mercure ne puissent envahir l'ampoule, ce voltage demeurera toujours le même.

Une fois l'amorçage obtenu, le courant n'a plus qu'un voltage de 14 volts à surmonter.

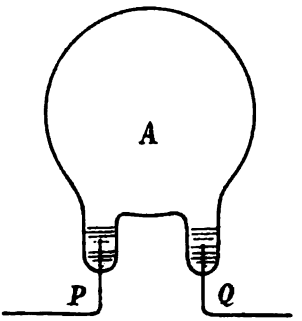


Fig. 15.

Enfin, lorsque le courant s'annule, la surface de la cathode cesse d'être désagrégée et elle reprend presque instantanément sa répugnance.

M. Cooper Hewitt a pu obtenir de cette manière des courants alternatifs parfaitement réguliers, ainsi que le révélait un miroir tournant, dont la fréquence atteignait 100 000. Rien ne lui a fait supposer que cette fréquence ne pût être dépassée, dans les mêmes conditions.

Cet appareil doit donc permettre de produire industriellement, et avec un très bon rendement, des courants alternatifs de haute fréquence, d'allure aussi régulière que ceux fournis par les alternateurs. La fréquence 10^5 est beaucoup trop faible pour qu'on puisse transmettre sans fil de l'énergie à grande distance, mais permet de la transmettre, par induction, à quelques mètres d'une ligne parcourue par un courant de haute fréquence.

On a reconnu expérimentalement la possibilité de transmettre un courant de haute fréquence, à grande distance le long d'une ligne électrique, sans déterminer de surtensions dangereuses. Il suffit, pour cela, de disposer de distance en distance des bobines de self-induction montées en dérivation entre les conducteurs d'aller et de retour, en les dimensionnant convenablement.

La soupape électrique, que nous avons décrite tout à l'heure, nous donne le moyen d'utiliser les courants ainsi transmis dans nos

moteurs actuels, en les transformant d'abord en courants continus.

IX. *Quatrième application des tubes à vide et à cathode de mercure. — Interrupteur pour courants alternatifs.* — Une application plus modeste, mais immédiate, a été faite de l'appareil précédent.

Lorsqu'un alternateur dessert une ligne ayant de la capacité, il y a toujours une certaine quantité d'énergie, qui est tantôt emmagasinée dans la ligne, tantôt dans l'alternateur, et s'échange constamment entre eux. Une ligne peut demeurer indéfiniment chargée, sans qu'aucun courant ne la traverse. L'interruption du courant dans une ligne ne déterminera donc pas la consommation immédiate de l'énergie qu'elle contient. Au contraire, l'énergie emmagasinée dans un alternateur, par suite de la self-induction de ses circuits d'armature, devra s'annuler avec l'intensité du courant. Si on vient à couper ces circuits, à un moment où cette intensité n'est pas nulle, l'énergie qu'ils auront emmagasinée se dégagera brusquement sous forme explosive.

Il y a donc un intérêt majeur à n'employer que des interrupteurs coupant le circuit au moment précis où l'intensité du courant passe par zéro.

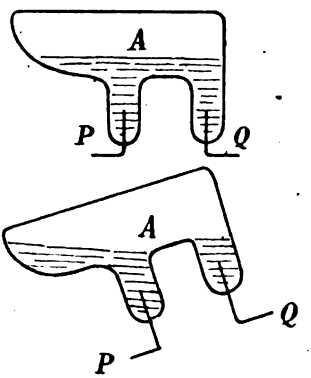


Fig. 16.

On constitue un semblable interrupteur avec l'exploseur de M. Cooper Hewitt, auquel on donne la forme représentée sur la *fig.* 16.

A l'état normal, les deux électrodes sont mises en court-circuit par le mercure.

Pour interrompre le courant, on culbute l'ampoule de manière à rompre le court-circuit. Un arc s'amorce et le courant n'a que

14 volts à surmonter pour passer. Mais, dès que son intensité devient nulle, l'électrode qui devrait ensuite jouer le rôle de cathode recouvre toute sa répugnance et le courant ne peut se rétablir.

X. *Résumé.* — Nous sommes heureux d'avoir pu appeler l'attention sur les travaux de M. Cooper Hewitt.

Il a montré que, contrairement à une opinion répandue, un tube à vide conduisait d'autant mieux le courant électrique que le vide y avait été poussé plus loin, une fois ce tube amorcé. C'est seulement l'amorçage qui devient de plus en plus difficile, lorsqu'on veut le déterminer avec une simple différence de potentiel et que le vide devient très grand. Mais on y arrive toujours avec la plus grande facilité, en établissant un court-circuit momentané dans le tube. L'arc qui jaillit dans le tube, au moment de la rupture du court-circuit, détermine toujours son amorçage, quel que soit le degré de vide.

Enfin, M. Cooper Hewitt a découvert cette propriété nouvelle des cathodes qu'il a appelée *répugnance* et a donné les moyens de la surmonter.

Les tubes à vide paraissent, dès maintenant, appelés à rendre les plus grands services industriels. Non seulement on peut faire avec eux des appareils d'éclairage intéressants, mais il est probable que, dans l'avenir, en suivant la voie ouverte par M. Hewitt, on pourra les appliquer à la production et à l'utilisation industrielle des courants de haute fréquence, avec lesquels on pourra, nous l'espérons, résoudre des problèmes nouveaux, relatifs à la transmission de l'énergie, qui ne sauraient l'être avec les moyens dont nous disposons aujourd'hui.

CONFÉRENCES

SUR L'ÉTAT ACTUEL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES

SUR LES TENDANCES ET LES RECHERCHES ACTUELLES DE L'ÉLECTROTECHNIQUE (1);

Par M. Paul Janet,
Professeur à l'Université de Paris, directeur du Laboratoire central
et de l'École supérieure d'Électricité.

Messieurs,

L'industrie, comme la vie, est soumise à la loi de l'évolution : les productions et les développements industriels ne s'opèrent pas au hasard, et ce n'est que par exception que jaillit une invention de génie ; la plupart du temps, les actions de milieu agissent d'une manière presque nécessaire sur la transformation et le perfectionnement des organes techniques, et, par action de milieu, j'entends ici les besoins plus ou moins urgents dont la satisfaction s'impose d'une manière si logique que, s'ils ne sont pas remplis aujourd'hui, nous pouvons assurer qu'ils le seront demain.

Mais, tandis que l'évolution des phénomènes vitaux s'étend sur de longs siècles, celle des phénomènes industriels, surtout à l'époque où nous vivons, est si rapide que nous pouvons en saisir sur le vif et les causes et les effets.

Imaginons donc qu'un observateur, partant de l'état où se trouvait l'industrie électrique il y a une vingtaine d'années et observant l'état où elle se trouve aujourd'hui, se propose de rechercher quelles sont les raisons profondes et logiques qui ont amené les modifications successives et continues que nous constatons dans la forme, la dimension, l'agencement, les principes mêmes de nos machines ou appareils électriques ; c'est une étude de ce genre que je voudrais entreprendre devant vous ; elle nous montrera dans quelle direction

(1) Conférence faite le 28 avril 1905.

générale évolue l'Électrotechnique et, en prolongeant par la pensée cette évolution, dont nous aurons saisi un moment, peut-être pourrons-nous entrevoir ce que nous réserve l'avenir ; cette prévision, sans doute, ne s'étendra pas bien loin ; du moins aurons-nous essayé de donner un tableau d'ensemble de ce qui constitue aujourd'hui les idées régnantes et les préoccupations dans le monde des électriciens.

I

Commençons, comme il est juste, par les génératrices du courant électrique : trois éléments ont influé sur leur forme et leurs dimensions ; ces éléments sont la puissance, la tension et la nature de la force motrice.

L'augmentation progressive de la puissance est un phénomène normal dont il n'y a pas lieu de s'étonner ; meilleur rendement des grosses unités, moindre surveillance, prix moins élevé, encombrement moins grand, telles sont les qualités qui ont peu à peu amené les constructeurs à l'étude des grandes machines ; la dynamo la plus puissante qui figurait à l'Exposition de 1889 avait 250 kilowatts ; en 1900, elle atteignait 3.000 kilowatts ; aujourd'hui on construit couramment des unités de 5.000 à 8.000 kilowatts. Il est douteux qu'on aille beaucoup plus loin, au moins dans la limite des besoins actuels ; dans une station centrale, la puissance de chaque machine ne doit être qu'une petite fraction de la puissance totale, d'abord pour que chaque machine puisse, autant que possible, fonctionner constamment à pleine charge, ce qui est une condition essentielle d'économie, ensuite pour que l'arrêt accidentel d'une machine ne produise pas de trouble grave sur le réseau ; si l'on réfléchit que, d'après les évaluations les plus récentes, les besoins d'une ville comme Paris ne dépassent pas, traction électrique mise à part, 70.000 à 80.000 kilowatts, on verra que des unités de 5.000 à 8.000 kilowatts conviennent bien en général et conviendront longtemps encore.

L'élévation des tensions s'est imposée dès que l'on a voulu étendre la portée et la puissance des transmissions électriques ; on sait, en effet, que, pour un rendement donné, la tension au départ est proportionnelle à la distance, à la racine carrée de la puissance à transmettre, et inversement proportionnelle à la racine carrée du poids de cuivre immobilisé dans la ligne ; autant de lois qui con-

cordent pour justifier les élévations de plus en plus grandes des tensions employées.

Quelle influence cette tendance à l'élévation progressive des tensions a-t-elle exercée sur la forme et les dimensions des machines ? C'est ce que nous allons examiner rapidement.

Ce qui limite la tension qu'on peut faire produire à une machine donnée, c'est uniquement, si l'on met à part les difficultés d'isolement, la vitesse à laquelle on peut faire tourner cette machine ; et ce qui limite cette vitesse, c'est la résistance des matériaux à la force centrifuge développée à la périphérie de la partie tournante. Cette force centrifuge est donc un élément essentiel à considérer dans la comparaison des machines. Or, on démontre aisément que, à force centrifuge égale, à induction moyenne égale dans l'entrefer, et pour un même nombre de conducteurs par unité de longueur à la périphérie, la force électromotrice d'une machine croît avec son rayon et avec sa profondeur (dimension parallèle à l'axe), mais plus rapidement avec son rayon qu'avec sa profondeur : on a donc été amené naturellement à augmenter progressivement le diamètre des parties tournantes plus encore que leur épaisseur ; mais en même temps, pour maintenir la force centrifuge dans des limites acceptables, il fallait réduire la vitesse angulaire de rotation : la machine moderne est donc devenue naturellement une machine de grand diamètre à marche lente. Pour fixer les idées, nous citerons les grands alternateurs de 5.000 kilowatts 11.000 volts, en service au métropolitain de New-York, qui tournent à 75 tours par minute et ont un diamètre de 5 mètres environ.

Le grand développement des moments d'inertie, la faible valeur des vitesses angulaires amena bientôt les parties tournantes des machines électriques à ressembler singulièrement aux volants des machines à vapeur : de là à confondre en un seul ces deux organes jusqu'alors séparés et à supprimer l'intermédiaire, inutile et gênant, des courroies de transmission, il n'y avait qu'un pas : c'est ce qui a été fait, et aujourd'hui l'ensemble de la machine motrice et de la machine électrique forme un tout absolument homogène, auquel doivent collaborer, sans s'ignorer l'un l'autre, l'ingénieur-mécanicien et l'ingénieur-électricien : ce sont les groupes électrogènes de nos usines modernes.

Les dynamos à courant continu et les alternateurs se sont développés à peu près parallèlement, au moins au point de vue de la per-

fection et de l'économie de leur construction ; mais, au point de vue de l'importance et du nombre des machines construites, les premières sont aujourd'hui bien dépassées par les seconds, à cause de la grande facilité avec laquelle le courant alternatif se prête à la production et à la transformation des hautes tensions. L'uniformité de types a succédé à la variété d'autrefois, et les machines d'aujourd'hui sont en général caractérisées par une symétrie parfaite autour de l'axe.

Pour la dynamo à courant continu, la forme multipolaire, avec couronne de pôles inducteurs extérieure et fixe, armature induite intérieure et mobile, est aujourd'hui absolument générale. L'armature est constituée par un cylindre rainuré suivant ses génératrices ; les conducteurs induits, solidement encastrés dans ces rainures, ne craignent plus ni les efforts radiaux de la force centrifuge, ni les efforts tangentiels des forces électromagnétiques ; l'entrefer, cette cause de grande dépense dans l'excitation des machines, est réduit à son minimum entre les surfaces, soigneusement tournées et alésées, de l'armature et des pièces polaires.

La raison d'économie de matière, de plus en plus impérieuse dans la construction moderne, conduit à dissiper les énergies perdues (hystérésis, effet Joule, courants de Foucault), dans des volumes de plus en plus restreints ; il en résulterait, si l'on ne prenait pas de précautions spéciales, des élévations de température excessives, que l'on évite par une étude attentive de la ventilation des induits ; de nombreux canaux de ventilation sont judicieusement ménagés dans la masse de la partie tournante, qui constitue ainsi un véritable ventilateur ; quelquefois même un ventilateur spécial envoie un puissant courant d'air dans la machine.

La commutation sans étincelles sous les balais, cette pierre d'achoppement qui a si longtemps arrêté les premiers inventeurs de la dynamo, continue, malgré tous les progrès faits dans cette voie, à faire l'objet de nombreuses études : si l'on réfléchit que, au moment du passage sous un balai, le courant doit se renverser dans une section en un temps qui est de l'ordre du 500e de seconde, on comprendra, malgré l'apparence paradoxale que peut avoir cet énoncé, que les phénomènes de self-induction ont une importance plus grande dans les machines à courant continu que dans les machines à courants alternatifs ; des tensions extrêmement élevées, auxquelles on a donné le nom de tensions de réactance, se développent ainsi et se

manifestent, si l'on n'y porte pas remède, par des étincelles destructives aux balais : les artifices généraux que l'on emploie pour les éviter consistent soit à diminuer, soit à équilibrer autant que possible ces tensions par d'autres convenablement choisies ; je ne ferai que rappeler pour mémoire l'ancienne méthode, qui n'était qu'un pis aller, et qui consistait à décaler les balais dans le sens du mouvement ; parmi les artifices plus modernes, je me bornerai à citer celui des pôles supplémentaires parcourus par le courant total de la machine et situés sur les lignes neutres ; celui des cornes polaires dissymétriques à l'entrée et à la sortie ; celui enfin de modes d'enroulements plus ou moins compliqués de l'induit, qui peuvent présenter certains avantages au point de vue de la diminution de la tension de réactance. Quoi qu'il en soit, on comprend l'importance des études expérimentales qui ont pour objet la détermination de la forme, en fonction du temps, du courant variable qui circule, pendant la commutation, dans chaque section d'une dynamo à courant continu ; ces études deviennent de délicates expériences de laboratoire, à cause de la petitesse de l'intervalle de temps mis en jeu.

L'alternateur moderne semble, lui aussi, avoir pris sa forme définitive : il se compose, à l'inverse de la dynamo à courant continu, d'une couronne d'induit, extérieure et fixe, et d'une roue, portant les pôles inducteurs, intérieure et mobile. Le nombre de ces pôles, qui dépasse rarement 12 ou 14 dans la machine à courant continu, atteint souvent 80 et plus dans les alternateurs ; ce grand nombre est nécessaire pour produire, avec des marches lentes, les fréquences 25 ou 50 usitées dans la pratique.

Le choix de l'induit comme partie fixe des grands alternateurs s'impose pour deux raisons très simples : d'abord il est plus facile d'isoler, pour de très hautes tensions, des parties fixes que des parties mobiles soumises à la force centrifuge ; et ensuite le grand moment d'inertie des inducteurs convient bien pour constituer un volant de la machine motrice. On construit ainsi, à l'heure actuelle, des alternateurs pouvant produire directement 10.000 à 12.000 volts.

Pourquoi cette disposition si logique ne s'étend-elle pas aux machines à courant continu ? Uniquement parce que, dans ces machines, les balais sont solidaires de l'inducteur, et que, par suite, si on rendait celui-ci mobile, il faudrait faire aussi tourner ceux-là, ce qu'on ne s'est pas encore résigné à faire, au moins pour les génératrices ; si on ajoute à cela que le collecteur des dynamos à courant

continu est toujours une pièce délicate et dont il est difficile d'isoler convenablement les lames consécutives, on reconnaîtra sans peine que les alternateurs se prêtent mieux que les dynamos à la production directe des hautes tensions.

Comme dans la machine à courant continu, le circuit induit des alternateurs se compose de barres logées dans des rainures pratiquées suivant les génératrices de l'armature. Il comporte un, deux ou trois enroulements, suivant qu'il s'agit d'un induit mono, di ou triphasé.

Les formes des machines paraissaient à peu près définitivement fixées lorsque l'apparition des turbines à vapeur vint tout modifier : la grande vitesse à laquelle doivent tourner ces moteurs impose des formes nouvelles pour les machines électriques ; pas un instant, en effet, il ne vint à l'idée de renoncer aux avantages si précieux des groupes électrogènes et de commander par courroie ou par engrenage les anciennes machines à marche lente.

Ici encore, comme précédemment, nous aurons surtout en vue les alternateurs, bien que dès maintenant on construise également des groupes : turbine à vapeur, dynamo à courant continu.

Tout d'abord nous remarquerons que les grandes vitesses exigées par les turbines entraînent pour les alternateurs un faible nombre de pôles : la relation entre la vitesse angulaire, exprimée en tours par minute, et le nombre des pôles, pour une fréquence donnée, est représentée par une hyperbole (*fig.* 1) : on voit, par exemple, que, pour la fréquence 25, la vitesse de la machine doit être de 1.500 tours par minute si l'alternateur est bipolaire et de 750 s'il est à 4 pôles : il résulte de là qu'aux grandes vitesses on a très peu de choix pour la vitesse et pour le nombre de pôles ; les machines lentes, au contraire, sont beaucoup plus souples et permettent une grande indétermination dans le choix des vitesses et du nombre de pôles : la *fig.* 1 le montre clairement. C'est là une difficulté sérieuse dans la construction des turbo-alternateurs.

En fait, les turbines sont construites en général pour 3.000 ou 1.500 tours par minute, quelquefois 750 ou 500.

A ces grandes vitesses, on ne pouvait plus songer aux inducteurs volants de grand diamètre : il fallut donc, bon gré mal gré, réduire ce diamètre, et revenir aux faibles diamètres d'autrefois ; mais, comme on prétendait garder le terrain conquis dans l'élévation des puissances et construire des turbo-alternateurs de 5.000 kilowatts et

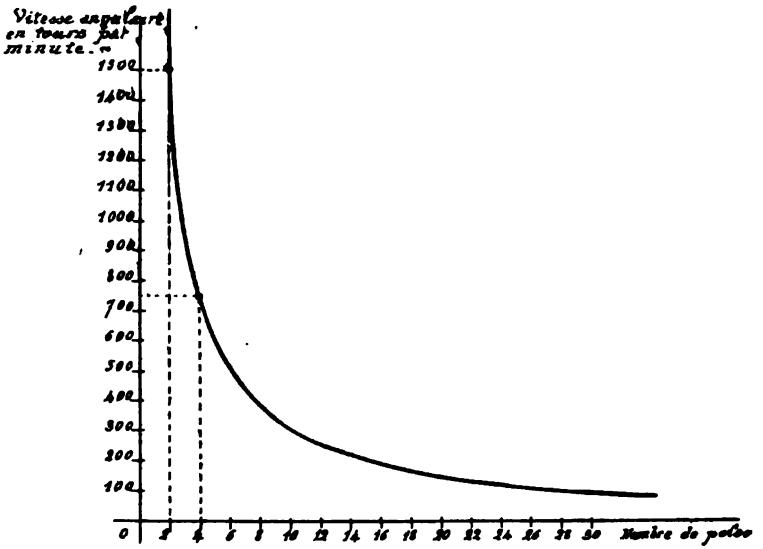


FIG. 1. — Relation entre le nombre de pôles, et la vitesse angulaire d'un alternateur devant donner la fréquence 25.

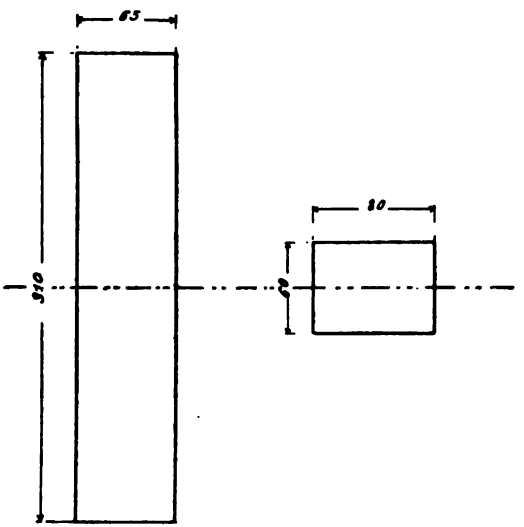


FIG. 2. — Dimensions comparées des parties tournantes d'un alternateur volant et d'un turbo-alternateur de même puissance (350 kilowatts) et de même tension (2.000 volts) ; vitesses respectives : 142 et 3.000 tours par minute.

plus, deux moyens seuls restaient disponibles : allonger la machine parallèlement à l'axe, et, si cela ne suffisait pas, élever, grâce à des perfectionnements de la construction mécanique, la force centrifuge tolérée à la périphérie de la partie tournante.

L'un et l'autre procédé ont été employés : en effet, si nous comparons (*fig.* 2) les dimensions analogues des inducteurs tournants de deux alternateurs triphasés de 350 kilowatts, 2.000 volts entre bornes, mus l'un par turbine à 3.000 tours par minute, l'autre par machine à vapeur à 142 tours par minute, nous voyons : 1° que la dimension parallèle à l'axe s'est allongée dans le turbo-alternateur de 65 à 80 ; 2° que le diamètre s'est réduit dans une proportion plus grande de 310 à 60 ; 3° comme conséquence, que la force centrifuge est

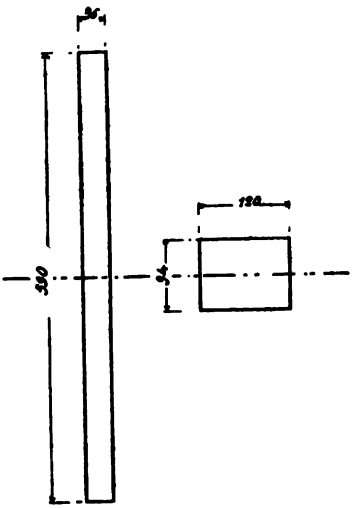


Fig. 3. — Dimensions comparées des parties tournantes d'un alternateur volant et d'un turbo-alternateur de même puissance (2.000 kilowatts) et de même tension (5.000 volts) ; vitesses respectives : 70 et 1.500 tours par minute.

beaucoup plus grande dans le premier que dans le second. Un calcul facile montre que, dans le premier, la force centrifuge est de 2.500 grammes-force par gramme-masse à la périphérie avec une vitesse de 80 mètres par seconde, tandis que, dans le second, elle est seulement de 40 grammes-force par gramme-masse à la périphérie avec une vitesse de 24 mètres par seconde. La *fig.* 3 permet la même comparaison pour deux autres alternateurs.

On conçoit aisément que, dans ces conditions, une augmentation de puissance des turbo-alternateurs ne peut plus guère être recherchée dans une augmentation de vitesse, et que le seul moyen qui reste disponible est un accroissement des dimensions parallèlement à l'axe : nous trouvons ainsi que deux alternateurs de 5.000 volts à 1.500 tours par minute, l'un de 480 kilowatts, l'autre de 2.000 kilowatts, ont à peu près le même diamètre (95 centimètres environ), mais ont des longueurs respectives de 46 et 120 centimètres (*fig.* 4).

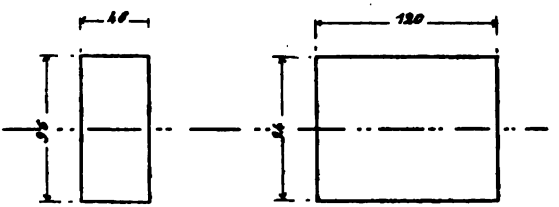


Fig. 4. — Dimensions comparées des parties tournantes de deux turbo-alternateurs, l'un de 480 kilowatts, l'autre de 2.000 kilowatts (5.000 volts, 1.500 tours par minute).

Ces efforts excessifs, devant lesquels on aurait reculé dans la construction ancienne, ont conduit à des formes toutes nouvelles pour les inducteurs tournants ; il n'y a plus de pôle saillant ; l'âme de l'inducteur est un cylindre rainuré suivant les génératrices ; les conducteurs, parcourus par un courant continu, qui font de cet inducteur un puissant électro-aimant, sont logés dans les rainures et maintenus en place par des coins très résistants et solidement encastrés ; les portions de fils extérieures aux rainures sont enroulées sur une portion lisse du cylindre et maintenues en place par des frettes métalliques solides ; si l'on réfléchit que ces frettes peuvent subir des efforts de 30 kilogrammes par millimètre carré et, d'autre part, n'être pas magnétiques pour éviter des dérivations magnétiques nuisibles, on reconnaîtra que le problème n'était pas facile à résoudre : les aciers au nickel, si bien étudiés par notre confrère, M. Guillaume, ont seuls permis d'y arriver.

Ces difficultés ne sont pas les seules ; un équilibrage parfait des parties tournantes est nécessaire, à ces grandes vitesses, tant au point de vue statique (centre de gravité sur l'axe) qu'au point de vue dynamique (coïncidence des axes de symétrie et d'inertie) : quiconque assiste, dans les ateliers de construction, à ces opérations

d'équilibrage, croit retrouver, pour ces puissantes machines, les délicates méthodes de nos laboratoires de physique.

Tous ces obstacles, et bien d'autres encore, ont été surmontés, et dès maintenant le turbo-alternateur semble être la grande machine de l'avenir.

II

Trois grands problèmes préoccupent actuellement les électriciens au sujet des alternateurs; ce sont : 1° le couplage; 2° le compoundage, et 3° la destruction des harmoniques.

1° Le couplage en parallèle des alternateurs s'est imposé dès que l'on a réalisé des grandes usines composées de plusieurs groupes électrogènes devant entrer successivement en fonction suivant les demandes de puissance sur le réseau; toutes les machines devant avoir exactement la même fréquence, leur isochronisme rigoureux s'impose, d'où une difficulté toute nouvelle que ne connaissaient pas les dynamos à courant continu.

Les propriétés mêmes des courants alternatifs, heureusement, apportent une solution à un problème que des régulateurs de vitesse purement mécaniques auraient été incapables de résoudre : en effet, si une machine tend à se mettre en avance sur les autres, la puissance qu'elle doit fournir augmente et la fait ralentir; sa marche a donc tous les caractères d'un équilibre stable; l'équilibre, troublé un instant par une cause accidentelle quelconque, se rétablit par une série d'oscillations dont la période dépend uniquement du moment d'inertie et des constantes électriques de l'alternateur; la loi de ces oscillations est celle du mouvement pendulaire, et leur période est par conséquent proportionnelle à la racine carrée du moment d'inertie et en raison inverse de la racine carrée du couple développé par un écart angulaire égal à l'unité.

Lorsque l'alternateur est conduit par une machine à vapeur à piston, le couple moteur lui-même est périodique, et la marche de la machine sera d'autant plus stable que sa période d'oscillation propre et la période du couple moteur seront plus différentes; au contraire, si ces périodes coïncident ou sont voisines, les oscillations s'amplifieront, et bientôt l'alternateur tombera hors de phase, accident qui peut être des plus graves, le réseau se trouvant en court-circuit sur l'alternateur *décroché*. On reconnaît là la théorie ordinaire

de la résonance, qui joue un si grand rôle dans toutes les parties de la physique.

Il est essentiel non seulement d'éviter autant que possible des oscillations, mais de les amortir rapidement dès qu'elles tendent à se produire; c'est là le rôle des circuits amortisseurs de M. Leblanc, qui consistent en une série de barres de cuivre traversant de part en part les pôles inducteurs, et mises en court-circuit de part et d'autre de la machine par deux cercles également en cuivre. Ce système joue exactement le rôle du cadre d'aluminium qui, dans certains modèles, amortissait les oscillations du galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

L'étude des conditions du maintien rigoureux de l'isochronisme des alternateurs couplés a conduit à une conclusion paradoxale; c'est que les régulateurs de vitesse des machines motrices devaient ne pas être trop sensibles; certains auteurs même ont été jusqu'à dire : devaient être supprimés, sauf un seul. On conçoit en effet que si, lorsqu'une avance d'un des alternateurs se produit, la machine motrice a un régulateur assez sensible pour s'accommoder immédiatement au supplément de puissance exigé par cette avance, le mécanisme purement électrique du maintien de l'isochronisme, que nous avons décrit plus haut, ne pourra se produire, et l'écart angulaire de l'alternateur ira en s'exagérant de plus en plus.

2° Le compoundage des machines électriques est un problème déjà ancien, puisque Marcel Deprez en a donné une solution bien connue, pour la dynamo à courant continu, dès 1881. Ce problème consiste, comme on le sait, à maintenir automatiquement la tension constante aux bornes d'une machine, quels que soient les incidents qui se produisent sur le réseau qu'elle alimente. Or, ce problème est beaucoup plus difficile à résoudre pour les alternateurs que pour les machines à courant continu ; dans les alternateurs, en effet, la chute de tension aux bornes, pour une excitation donnée, dépend de deux variables, le débit et la différence de phase entre le courant et la tension, tandis que, pour les machines à courant continu, elle ne dépend que d'une variable, qui est le débit.

Si le compoundage avait uniquement pour but d'éviter un réglage à la main pour le remplacer par un réglage automatique, il serait déjà important, mais ne le serait que dans des cas particuliers.

Mais ce qui fait la véritable importance du compoundage des machines et en particulier des alternateurs, c'est qu'il permet une économie sensible sur leur construction.

Ce point de vue n'est pas évident, et mérite d'arrêter quelques instants notre attention : prenons un alternateur ordinaire, à faible chute de tension; en augmentant la profondeur des rainures de l'induit, nous pouvons y loger plus de fils; en diminuant l'entrefer, nous pouvons augmenter, pour une même excitation, le flux utile; toutes ces modifications augmentent, sans dépense de matière, la tension de la machine, et par suite sa puissance; mais elles augmentent aussi la réaction de l'induit, de sorte que, pour maintenir constante la tension entre la marche en charge et la marche à vide, la gamme des variations du courant inducteur doit être telle que le réglage à la main devient impossible; c'est ici qu'intervient l'utilité du compoundage; des solutions purement électriques du problème ont été données dans ces dernières années par MM. Maurice Leblanc, Boucherot, Blondel; des solutions électromécaniques, c'est-à-dire faisant entrer en jeu simultanément le réglage de l'excitation et celui de la machine motrice, par M. Routin et M. Picou.

Le système de M. Boucherot, qui paraît le plus répandu à l'heure actuelle, consiste dans l'emploi sur chaque phase de deux transformateurs, l'un dont le primaire est en dérivation sur les bornes de l'alternateur, l'autre dont le primaire est en série avec le circuit général. Les secondaires de ces transformateurs, convenablement calculés, sont en série, et les forces électromotrices ainsi obtenues sont utilisées à produire un champ tournant dans l'entrefer d'une machine spéciale qui servira d'excitatrice. Dans ce champ tourne, avec une vitesse différente, un induit à collecteur monté sur l'axe même de l'alternateur; grâce à un enroulement spécial de cet induit, on s'arrange pour que les pôles électriques restent fixes sur le collecteur, comme dans les machines à courant continu ordinaires; des balais placés en ces points recueillent donc un courant continu qui sert à l'excitation de l'alternateur principal et dont l'intensité se règle automatiquement pour maintenir constante la tension aux bornes.

3° Les forces électromotrices produites par les alternateurs ne sont pas rigoureusement sinusoïdales; comme toute fonction périodique du temps, elles peuvent être considérées comme la superposition d'un terme fondamental, le plus important de tous, et d'une série d'harmoniques de périodes sous-multiples de la période principale; ces harmoniques sont dus à deux causes : en premier lieu, aux formes respectives des pièces polaires et des bobines induites; en second lieu, à la présence sur l'armature des rainures et des dents

qui produisent des fluctuations du flux et, par suite, de la force électromotrice ; on peut prévoir sinon la grandeur, au moins l'ordre de ces derniers : par exemple, un alternateur triphasé à une rainure par pôle et par phase donne surtout les harmoniques qui ont 5 fois et 7 fois la fréquence du terme fondamental ; de même, pour 2 rainures par pôle et par phase, il donne les harmoniques 11 et 13, et enfin, pour 3 rainures par pôle et par phase, les harmoniques 17 et 19, et ainsi de suite.

La production de ces harmoniques est à tous les points de vue nuisible, et l'on voudrait à tout prix se rapprocher d'une courbe sinusoïdale ; de nombreuses tentatives ont été faites dans ce sens : on a taillé d'une manière plus ou moins empirique les bords des pièces polaires ; on a incliné les rainures sur les génératrices du cylindre d'armature ; on a proposé de composer l'induit de deux moitiés légèrement décalées l'une par rapport à l'autre ; tous ces moyens ont donné de bons résultats ; mais ce n'est que tout récemment que M. Maurice Leblanc s'est attaqué directement au problème et a présenté ce qu'il a appelé énergiquement : un étouffeur d'harmoniques. Ce système, fondé sur un principe analogue à celui de l'amortisseur, et qui n'est autre chose qu'un amortisseur de grande résistance, est encore trop nouveau pour qu'on puisse porter un jugement sur lui.

III

Les diverses génératrices électriques étant ainsi décrites, voyons la place qu'elles tiennent dans les stations centrales modernes.

Les moteurs qui les conduisent peuvent être hydrauliques, à vapeur ou à gaz.

Nous n'avons pas à rappeler ici l'importance des installations hydro-électriques : on évalue à plus de 500.000 chevaux la puissance ainsi utilisée en France. Basses chutes à grand débit, hautes chutes à faible débit, voilà les deux extrêmes entre lesquels se placent toutes les grandes usines existantes. Comme exemple des premières, nous citerons l'usine des forces motrices du Rhône, à Jonages, près de Lyon, qui produit 12.000 chevaux avec une chute de 11 mètres et des alternateurs à marche lente de 120 tours par minute ; comme exemple des secondes, l'usine de Vouvry, près du lac de Genève, qui utilise une chute de 1.000 mètres de hauteur, avec des alterna-

teurs de 2.000 kilowatts à grande vitesse, à induit tournant, qui font 1.000 tours par minute.

L'installation hydro-électrique la plus grandiose à l'heure actuelle est celle du Niagara, où l'on trouve à la fois un débit colossal et une hauteur déjà très notable (40 mètres environ). Cette installation se partage entre 5 compagnies qui peuvent disposer de 750.000 chevaux, sur lesquels 155.000 seulement étaient installés en octobre 1904, et 115.000 vendus ; le capital immobilisé par ces cinq compagnies est de 132.500.000 francs.

Dans les installations mues par la vapeur, l'ancienne machine à piston est encore loin d'être détrônée par la turbine : la double et triple expansion, la surchauffe, les économiseurs, l'augmentation de la puissance des unités ont abaissé la consommation à 5 kilogrammes de vapeur par cheval-heure.

Comme exemple d'une des plus importantes stations à vapeur du monde, nous citerons celle du métropolitain de New-York, qui alimente 800 trains circulant sur un réseau souterrain de 24 kilomètres environ. Cette station comprend 9 groupes électrogènes de 8.000 chevaux chacun. Les machines à vapeur sont à double expansion, avec cette disposition particulière que les cylindres à haute pression sont horizontaux et les cylindres à basse pression verticaux, la course des pistons étant la même pour chacun d'eux.

Le caractère d'homogénéité que nous avons reconnu dans les groupes électrogènes se retrouve dans l'ensemble des grandes usines à vapeur telles que celle dont nous parlons maintenant ; la manipulation du charbon et des cendres prend un caractère tout à fait scientifique : le charbon est élevé, par des wagonnets se mouvant sur plan incliné, jusqu'au faîte du bâtiment où, suivant un usage très répandu maintenant, se trouvent les soutes à charbon, en sorte que, ce premier travail effectué, c'est la pesanteur seule qui conduira le charbon des soutes aux foyers des chaudières, puis les cendres des foyers aux wagonnets destinés à les enlever ; le chargement des chaudières se fait d'une manière tout à fait automatique, et les chauffeurs sont entièrement supprimés ; partout la main-d'œuvre est réduite à sa plus simple expression ; toute la manœuvre des wagonnets se fait par traction électrique et moteurs à courants alternatifs ; ce système est capable d'élever 200 tonnes de charbon par heure, ce qui est beaucoup plus que suffisant, puisqu'on peut admettre en nombre rond que, à pleine charge, une usine de 80.000 chevaux,

comme celle-ci, brûle 80 tonnes de charbon par heure. Une remarquable installation du même genre est à citer au Métropolitain de Paris.

Nous avons déjà attiré l'attention sur l'importance tous les jours plus grande que prennent les groupes électrogènes mus par turbine à vapeur : la turbine de Laval, qu'on ne peut se dispenser de citer ici[1], la turbine Parsons, la première qui ait réalisé de grandes puissances avec des marches relativement lentes, la turbine Rateau en France, la turbine Curtis en Amérique, sont les plus connues.

Malgré l'inconvénient de leur grande vitesse, les turbines ont tellement d'avantages que leur usage se répand de jour en jour ; cela est si vrai que la Commission chargée de l'étude du régime futur de l'électricité à Paris n'a pas hésité un instant à recommander, pour une installation qui atteindra 80.000 kilowatts, l'usage de turbo-alternateurs de 5.000 kilowatts chacun. Il est curieux de constater que l'on retrouve aujourd'hui, sous ces formes puissantes, le principe qu'Héron d'Alexandrie avait utilisé il y a plus de vingt siècles dans une machine qui n'était qu'un jouet.

Le principal avantage des turbines, qu'elles doivent précisément à leur grande vitesse, est le moindre encombrement : un groupe de 3.200 kilowatts pèse 20 tonnes, dont 9 pour la turbine et 11 pour l'alternateur ; le même groupe, avec une machine à piston, pèserait 400 tonnes ; — le premier a un encombrement horizontal de 16 mètres de long sur $3^{m},50$ de large, soit 56 mètres carrés ; le second occuperait environ 280 mètres carrés, c'est-à-dire 5 fois plus. La turbine Curtis, dont l'axe est vertical, a un encombrement horizontal encore plus réduit, 7 0/0 de celui d'une machine à vapeur de même puissance.

Les turbines comportent encore de nombreux avantages : la circulation uniforme de la vapeur toujours dans le même sens laisse chaque point à la même température, et par suite évite les condensations et vaporisations successives si nuisibles dans la machine à vapeur ; la régularité de la vitesse et l'absence de tout couple périodique sont, comme nous l'avons vu, des avantages précieux au point de vue du couplage des alternateurs ; l'absence de matières lubréfiantes dans les parties en contact avec la vapeur permet une surchauffe plus considérable que dans les machines à vapeur ordinaires, où les huiles

---

[1] Voir *Bulletin de la Société de Physique*, 1894, p. 147.

sont détruites par une surchauffe trop élevée et où l'on ne peut guère dépasser 250°, tandis qu'on va jusqu'à 300° dans les turbines; l'eau de condensation qui n'est pas souillée par des matières grasses peut immédiatement servir à l'alimentation de la chaudière. Grâce à toutes ces qualités, la consommation de vapeur s'est abaissée aujourd'hui à moins de 5 kilogrammes de vapeur par cheval-heure, c'est-à-dire est devenue comparable à celle des meilleures machines à vapeur.

L'inconvénient le plus grave est la nécessité d'une condensation extrêmement parfaite : on atteint aujourd'hui couramment des vides de quelques centimètres de mercure, le rendement de la turbine baissant extrêmement vite avec un mauvais vide au condenseur [1]: ceci exige une alimentation en eau très abondante et telle qu'on ne la peut trouver, pour de grandes installations, qu'au bord d'un fleuve ou d'une rivière; un autre inconvénient est la difficulté de construire des groupes de faible puissance, non au point de vue de la turbine, qui, au contraire, se prête très bien à ces faibles puissances, mais au point de vue de l'alternateur et surtout de la dynamo à courant continu.

Un usage extrêmement intéressant des turbines à basse pression a été fait par M. Rateau pour utiliser les vapeurs d'échappement des machines à vapeur ordinaires sans condensation; ces vapeurs s'écoulent d'une manière intermittente à chaque coup de piston; grâce à un appareil extrêmement ingénieux, qu'il nomme un accumulateur de chaleur, dont la capacité calorifique emmagasine, puis restitue de la chaleur, M. Rateau transforme cet écoulement intermittent en écoulement continu propre à alimenter une turbine : c'est ainsi qu'aux mines de Bruay la vapeur d'échappement d'une machine d'extraction, à $0^{kg},9$ par centimètre carré, est détendue par l'intermédiaire d'un accumulateur de chaleur, d'une turbine à basse pression et d'un condensateur jusqu'à la pression de $0^{kg},15$ par centimètre carré. La turbine actionne deux dynamos à courant continu dont l'énergie, aux frais d'installation près, est absolument gratuite, puisqu'elle utilise des vapeurs qui auparavant se perdaient librement dans l'atmosphère. Si l'on réfléchit que, dans les mines par exemple,

---

[1] Un kilogramme de vapeur se détendant depuis la pression de 10 kilogrammes par centimètre carré jusqu'à la pression atmosphérique normale donne théoriquement 39.000 kilogrammètres; se détendant jusqu'à une pression de $0^{kg},206$ par centimètre carré, il donne 59.000 kilogrammètres, et jusqu'à une pression de $0^{kg},070$ par centimètre carré, 73.000 kilogrammètres.

certaines machines d'extraction consomment en moyenne 5.000 à 6.000 kilogrammes de vapeur par heure ; que, dans les aciéries, certains laminoirs consomment jusqu'à 20.000 kilogrammes de vapeur par heure, et que ces machines marchent souvent sans condensation, on verra que, par l'application des turbines à basse pression et d'une condensation aussi parfaite que possible, on pourra gagner de 600 à 700 chevaux dans le premier cas, et près de 2.000 dans le second [1], qu'on pourra utiliser et transporter sous forme électrique.

La dernière source motrice que nous avons à examiner est le moteur à gaz : réduit pendant bien longtemps à la production des petites puissances, il s'est développé depuis quelques années avec une rapidité extraordinaire ; on peut voir aujourd'hui des moteurs à gaz à quatre cylindres en double tandem, à double effet, de 6.000 chevaux, ayant un rendement thermique (rapport entre la puissance utilisée et la puissance contenue dans la houille) de 38 0/0.

Il va sans dire que ces puissantes machines n'utilisent pas le gaz de ville ; elles utilisent uniquement le gaz pauvre (et dans ce cas la consommation s'abaisse à 450 grammes de houille par cheval-heure) ou les gaz perdus provenant des hauts fourneaux ; cette dernière application surtout semble prendre actuellement un développement grandiose : un haut fourneau produisant 100 tonnes de fonte par jour donne environ 16.000 mètres cubes de gaz par heure, qui peuvent produire une puissance d'au moins 2.000 chevaux ; dans ces conditions, le kilowatt-an reviendrait à 100 ou 120 francs (intérêt et amortissement compris) : on évalue à 600.000 chevaux la puissance ainsi perdue en Allemagne pour une production de 8.000.000 de tonnes de fonte ; on peut dire que, lorsque toute cette puissance sera utilisée, — et elle ne peut l'être que sous la forme électrique, — la production de la fonte deviendra l'accessoire et celle de l'énergie la principale dans les pays de hauts fourneaux.

IV

L'énergie électrique étant produite par un des procédés que nous venons d'étudier, il s'agit de la transporter ; les distances de transport augmentent tous les jours : San-Francisco utilise pour ses

---

(1) Voir P. Chalbil, *l'Utilisation des vapeurs d'échappement* (*Revue générale des Sciences*, t. XV, p. 1041).

tramways l'énergie produite par les chutes de l'Ubax, à une distance de 355 kilomètres.

Le système le plus généralement employé est celui des courants triphasés à haute tension : l'énergie est produite au moyen de groupes électrogènes de 1.000 à 7.000 kilowatts, directement jusqu'à 10.000 ou 12.000 volts environ, par transformation jusqu'à 25.000 volts, et souvent par double transformation au-dessus de 25.000 volts.

La tension la plus élevée en France est de 28.000 volts (réseau de l'Énergie électrique du Littoral méditerranéen), en Europe de 40.000 volts (Transport de Gromo à Membro dans le Nord de l'Italie), en Amérique de 50.000 volts (Missouri River Power C°).

En général les lignes employées pour les très grandes distances sont aériennes, en cuivre, ou quelquefois en aluminium ; les hautes tensions que nous venons de signaler amènent à employer des isolateurs à plusieurs cloches et de très grandes dimensions pour éviter les décharges disruptives : ceux de la Missouri River ont 22 centimètres de diamètre et 13 centimètres de hauteur. Pour la même raison, et pour éviter les effluves entre fils, les conducteurs doivent être écartés les uns des autres ; dans la même installation, les trois fils de la ligne triphasée occupent les trois sommets d'un triangle équilatéral de 2 mètres de côté.

Les lignes souterraines, dont on peut évaluer le prix à trois fois celui des lignes aériennes, sont beaucoup moins répandues ; cependant on sait aujourd'hui construire des câbles qui, aux essais, résistent à une tension de 100.000 volts ; des théories nouvelles et fort simples ont montré que, dans un câble, toute la masse de l'isolant ne travaille pas à la même tension, et que c'est dans le voisinage immédiat du conducteur que le gradient du potentiel est le plus élevé [1] ; ce sont donc les régions où il faut surtout employer des isolants à grande rigidité électrostatique. La plus longue ligne souterraine (comme transport) qui existe en France est une ligne de 13 kilomètres à 10.000 volts sur le réseau de la Méditerranée ; des câbles à 26.000 volts sont en service à Toulon. Les lignes aériennes ont, par rapport aux lignes souterraines, le grave inconvénient d'être exposées aux accidents dus à l'électricité atmosphérique. Les coups de foudre directs sont rares, et les électriciens, à l'heure actuelle,

[1] Un câble armé, construit pour supporter 25.000 volts, avec 14mm,5 d'épaisseur d'isolant, supporte 5.000 volts par millimètre dans le voisinage du conducteur, et seulement 2.270 volts par millimètre dans le voisinage de l'enveloppe.

semblent craindre surtout les élévations de tension causées indirectement soit par des phénomènes d'influence électrostatique, soit par des phénomènes d'induction provoqués par les décharges oscillantes dues aux coups de foudre voisins. Il semble que, tant que l'isolement des lignes était médiocre, comme c'était le cas pour les lignes à basse tension, les élévations anormales de tension ne se produisaient pas, l'équilibre ayant le temps de s'établir suffisamment par la faible conductibilité des supports. Mais, à mesure que l'isolement est plus soigné, les hautes tensions dues aux phénomènes atmosphériques peuvent se développer sans se dissiper au fur et à mesure, et alors elles cherchent un point faible où elles provoquent des désordres importants. La question des parafoudres, destinés à intervenir en cas de décharge brusque, et des limiteurs de tension, destinés, par des fuites volontairement établies, à empêcher toute élévation de tension, est donc devenue capitale dans les transmissions à longue distance.

Mais, qu'il s'agisse de câbles souterrains ou de lignes aériennes, d'autres élévations de tension sont à craindre : ce sont celles qui sont dues soit à la résonance inattendue d'un harmonique de la tension principale dont la période se trouve coïncider avec celle des oscillations propres de la ligne, soit à la rupture brusque d'un court-circuit qui provoque ce que l'on appelait autrefois un extra-courant de rupture, extra-courant dont le calcul est fort compliqué si on veut tenir compte de toutes les circonstances qui interviennent. Aussi les parafoudres et les limiteurs de tension sont-ils aujourd'hui considérés et étudiés comme des appareils de protection contre toutes les élévations anormales de tension, que ces élévations soient d'origine atmosphérique ou autre.

Les appareils accessoires dans ces grandes lignes de transmission prennent une grande importance : c'est ainsi que les interrupteurs deviennent de véritables machines ; la rupture de l'arc dans l'air entraînerait à des dimensions tout à fait excessives ; aussi, l'usage est-il très généralement répandu aujourd'hui de rompre ces arcs dans l'huile. Nous citerons ici un interrupteur triphasé, à huile, capable d'interrompre une puissance de 750 kilowatts sous 30.000 volts. Les disjoncteurs du Métropolitain de New-York, qui peuvent couper 5.000 kilowatts sous 11.000 volts, sont d'un type analogue.

En général, le courant triphasé à haute tension n'est pas utilisé

tel quel à la station d'arrivée ; il est soit transformé en courant triphasé à tension moindre, soit même transformé en courant continu à basse ou moyenne tension par commutatrices ou par des groupes moteurs-générateurs.

Parallèlement au système de transmission par courants triphasés à haute tension, se développait sur un champ d'action plus restreint le très intéressant système série à intensité constante par courants continus à haute tension. Ce système, auquel s'attache invinciblement le nom de M. Thury, consiste à placer en série, sur un même circuit, toutes les génératrices d'une part, toutes les réceptrices de l'autre, et à faire varier, suivant la demande de puissance, non pas l'intensité du courant, qui reste constante à toute charge, mais la tension de la station génératrice.

Le plus récent exemple et le plus beau d'un transport par courant continu série est celui de Saint-Maurice-Lausanne, sur une distance de 56 kilomètres ; le courant est constant et maintenu, quelle que soit la demandede puissance, à 150 ampères. La tension, au contraire, peut varier de 0 à 23.000 volts. A l'arrivée, le courant principal met en mouvement des groupes moteurs-générateurs, de manière à transformer le système intensité constante, qui se prête bien aux longues transmissions, en système à potentiel constant, qui se prête bien aux distributions urbaines. Parmi ces groupes, les uns donnent du courant continu à 500 volts pour les tramways, les autres du courant triphasé à 110 volts pour l'éclairage. Il est assez curieux de rencontrer ici un système où l'énergie est *transportée* sous forme de courant continu et *distribuée* sous forme de courants triphasés.

Tout récemment, un grand transport par le système du courant continu série vient d'être décidé entre Moutiers et Lyon, à une distance de 180 kilomètres ; la tension atteindra 57.600 volts, et l'intensité constante sera de 75 ampères, ce qui correspond à une puissance maxima de 4.320 kilowatts.

V

Parmi les diverses formes sous lesquelles peut être utilisée l'énergie électrique, la plus importante est la forme mécanique. Les moteurs à courant continu, les moteurs synchrones ou asynchrones à courants alternatifs polyphasés sont classiques aujourd'hui. Le seul

problème qui restait à résoudre jusqu'à ces derniers temps était celui du moteur monophasé ; on possédait bien, il est vrai, le moteur asynchrone monophasé; mais ce moteur démarre mal et par des artifices compliqués ; c'est surtout à ce point de vue d'un puissant couple de démarrage que se sont placés les inventeurs récents, et en particulier l'un des plus distingués de nos anciens élèves de l'École supérieure d'Électricité, M. Marius Latour. Ces nouveaux moteurs, dont l'avenir semble considérable pour la traction électrique, sont fondés sur l'artifice du collecteur étendu aux courants alternatifs. Tout le monde sait que, si l'on envoie un courant alternatif dans un moteur ordinaire à courant continu excité en série, ce moteur se met à tourner : cela tient à l'une des lois fondamentales d'Ampère, à savoir que le sens des actions qui s'exerce entre deux circuits ne change pas si l'on renverse à la fois le courant dans l'un et l'autre de ces deux circuits. Mais un moteur simple, ainsi constitué, a des inconvénients graves : en premier lieu, les courants induits dans les noyaux massifs des inducteurs (courants de Foucault) entraînent une perte d'énergie considérable et, par suite, un mauvais rendement : il est facile de remédier à cet inconvénient en substituant aux noyaux massifs des noyaux de tôle feuilletée; en second lieu, la self-induction considérable de ces moteurs réduit beaucoup la puissance qu'on peut leur demander pour un volume ou un poids donné : parmi les différentes solutions qu'on a données du problème consistant à réduire cette self-induction sans rien sacrifier sur le couple utile, l'une des plus ingénieuses est due à M. Marius Latour : elle consiste à placer, à angle droit avec les balais ordinaires, c'est-à-dire suivant la ligne des pôles, deux autres balais réunis en court-circuit; la théorie complète de ce moteur est trop délicate pour pouvoir être abordée ici.

Nous n'avons pas à décrire les applications véritablement innombrables qu'ont aujourd'hui les moteurs électriques : application aux ateliers de toute espèce, ateliers mécaniques, ateliers de filature et de tissage, etc. ; application aux appareils de levage, grues, treuils, ponts roulants ; application aux mines (pompes, ventilateurs, tracteurs, etc.), où la plus puissante des machines minières, la machine d'extraction, commence à être commandée électriquement[1]. Mais

---

[1] La machine d'extraction, à marche essentiellement intermittente, et mue jusqu'ici par la vapeur, entraine des dépenses excessives de vapeur (jusqu'à

l'industrie où les moteurs électriques ont exercé la plus profonde influence est celle de la traction. Nous ne rappellerons que pour mémoire l'immense développement des tramways électriques, dont les réseaux atteignent une longueur de 96.400 kilomètres en Amérique, et nous rechercherons seulement les tendances qui se manifestent actuellement pour la traction des trains lourds sur des lignes interurbaines de grande longueur; ces tendances peuvent se ramener à deux : la substitution aux trains remorqués par une locomotive de trains constitués par des voitures toutes automotrices, et l'emploi des courants alternatifs à haute tension.

La première disposition a l'avantage de substituer à un moteur unique, qui deviendrait trop puissant et peu maniable, une grande quantité de moteurs plus petits, attaquant directement les essieux de toutes les voitures. L'adhérence utile est ainsi augmentée ; on se débarrasse du poids mort de la locomotive, et le réglage de tous ces moteurs de moyenne puissance est plus facile que celui d'un ou deux moteurs de très grande puissance; ce réglage s'effectue de la manière suivante : le contrôleur (pour conserver le mot, maintenant passé dans l'usage pour désigner l'appareil de réglage placé sous la main du mécanicien) ne commande plus directement le courant envoyé aux moteurs; il ne commande que des relais placés sous chaque voiture. Aussi ce contrôleur peut-il être de dimensions très réduites, puisqu'il n'y passe que des courants faibles, et il est curieux de constater que l'appareil de manœuvre des trains lourds à grand nombre de voitures est de dimensions plus restreintes que le contrôleur ordinaire de nos tramways. Les relais dont il a été question opèrent d'ailleurs, sous chaque voiture, les manœuvres ordinaires de réglage, c'est-à-dire, au démarrage, la suppression graduelle des résistances en série, les deux moteurs de chaque voiture étant en série, puis, une fois ces résistances supprimées, la mise en parallèle des deux moteurs avec résistances en série, et enfin, pour les grandes vitesses, la suppression totale des résistances, les deux moteurs étant en parallèle.

La deuxième tendance, qui se manifeste dans la grande traction

---

49 kilogrammes de vapeur par cheval-heure sur le câble d'extraction). En employant des moteurs électriques, et en emmagasinant l'énergie pendant les périodes de descente, soit dans de lourds volants, soit dans des batteries d'accumulateurs, on annonce des consommations de 18 kilogrammes par cheval-heure; en fait, dans une installation existante, on a constaté des économies de un tiers sur le combustible employé.

comme dans les transports à grande distance, c'est l'emploi de hautes tensions. Les moteurs de traction, qui sont si exposés aux courts-circuits, ne se prêtent pas à l'utilisation directe de ces hautes tensions : un intermédiaire est indispensable. Dans les systèmes les plus répandus jusqu'ici, cet intermédiaire se trouve dans les sous-stations de transformation. Dans ces sous-stations, l'énergie électrique, amenée sous forme de courants alternatifs à haute tension, est transformée d'abord en courants alternatifs à basse tension par des transformateurs statiques, puis en courant continu, soit par des commutatrices, soit par des groupes moteurs-générateurs, et enfin transmise aux trains en marche par des frotteurs appropriés.

Ces sous-stations sont fort coûteuses, et d'installation et d'entretien : aussi la tendance actuelle est-elle de transmettre directement le courant à haute tension aux trains en marche, de le transformer en courant à basse tension, au moyen de transformateurs statiques placés sur ces trains eux-mêmes, et de l'utiliser sous forme alternative sans le transformer en courant continu : c'est donc la question des moteurs à courants alternatifs qui se pose d'une manière à peu près forcée, à moins qu'on ne redresse le courant alternatif par un commutateur tournant synchrone en évitant les étincelles par des artifices appropriés.

Une qualité qui prime tout dans les moteurs de traction est la possibilité de démarrages puissants et rapides. Or, jusqu'à ces dernières années, les moteurs triphasés pouvaient seuls, en courant alternatif, être agencés de manière à avoir cette propriété que possède à un si haut degré de perfection le moteur série à courant continu. Mais l'emploi du courant triphasé exige au moins deux contacts frottants, en admettant que l'on se serve des rails comme troisième conducteur ; on est donc amené à cette difficulté considérable : établir deux ou trois contacts frottants, à haute tension, entre une ligne fixe et un train à grande vitesse; comme exemple de la tentative la plus intéressante faite dans ce sens, nous citerons les essais faits en Allemagne sur la ligne Marienfeld-Zossen, de 23 kilomètres de long. Le courant triphasé, à 14.000 volts entre fils, est amené à la voiture par prises de courant à archet. La voiture porte quatre moteurs de 200 kilowatts chacun, pouvant atteindre 600 kilowatts au démarrage ; le courant est transformé, sur la voiture, soit à 1.200 volts (Siemens), soit à 500 volts (A. E. G.); on a atteint, sur une voie exceptionnellement bonne et préparée pour cet essai, des vitesses

de 200 kilomètres par heure; à ces vitesses, la pression de l'air à l'avant de la voiture atteint 200 kilogrammes par centimètre carré.

L'inconvénient des deux prises de courant n'est pas le seul des moteurs triphasés; ces moteurs sont d'une construction délicate, à cause du très faible entrefer qu'ils doivent avoir, et de plus ce sont des moteurs à vitesse presque rigoureusement constante. On a essayé, pour faire varier cette vitesse, un grand nombre d'artifices dont voici les principaux : passage de la connexion en étoile à la connexion en triangle des enroulements; montage en cascade de deux moteurs, le rotor du premier, au lieu d'être en court-circuit, étant fermé sur le rotor du second, et le stator de celui-ci en court-circuit; changement du nombre de pôles du moteur par des connexions convenables. Tous ces artifices sont plus ou moins compliqués ou insuffisants, et l'on ne retrouve plus ici la souplesse du courant continu. Aussi espère-t-on beaucoup des nouveaux moteurs à courants alternatifs à collecteur dont nous avons parlé plus haut et qui partagent jusqu'à un certain point les qualités des moteurs à courant continu. Il existe dès maintenant un certain nombre de lignes à traction alternative monophasée à prise de contact unique; la tension est abaissée par un transformateur placé sur la voiture même, et le réglage de vitesse s'obtient soit par l'intercalation de bobines de réaction, soit par la variation du rapport de transformation du transformateur.

Parallèlement à ces tentatives se développent aussi d'intéressants essais de traction par courant continu à haute tension : comme exemple, nous citerons la locomotive construite par la Compagnie de l'Industrie électrique pour la ligne de Saint-Georges-de-Commiers à la Mure (Isère), qui comporte 4 moteurs de 125 chevaux chacun, à 600 volts, constamment en série; le courant, à 2.400 volts, est amené à la locomotive par deux archets; le milieu du circuit des moteurs est à la terre par l'intermédiaire des rails, en sorte que la différence de potentiel dangereuse n'est que de 1.200 volts.

Les projets de grande traction électrique se développent rapidement; la Suède estime qu'avec ses 100.000 chevaux de chute d'eau elle pourrait alimenter ses 4.950 kilomètres de chemin de fer et réaliser ainsi une économie de 50 0/0 sur les 20 millions qu'elle dépense annuellement; la Suisse estime que 90.000 chevaux hydrauliques pourraient être utilisés sur ses voies ferrées; en France, l'exploitation électrique de portions de réseaux (Paris à Versailles, sur la Compagnie de l'Ouest; Paris à Juvisy, sur la Compagnie d'Orléans; le

Fayet-Saint-Gervais, sur le P.-L.-M.), a donné d'excellents résultats. En Amérique, le New-York Central possède une locomotive à quatre essieux, de 2.000 chevaux, 500 par essieu, à 500 volts par courant continu.

VI

La dernière grande application dont j'ai à rechercher l'évolution actuelle est l'éclairage. L'incandescence du charbon, soit dans l'arc, soit dans la lampe à incandescence, est jusqu'ici la source de lumière généralement employée. Peut-on trouver mieux que le charbon ? Il est permis de le supposer ; les propriétés du charbon le rapprochent en effet du corps noir théorique ; et l'on sait qu'il existe des corps réels ayant un rendement lumineux (rapport de la puissance rayonnée dans la partie visible du spectre à la puissance rayonnée totale), meilleur que celui du corps noir.

Dans le domaine de l'arc, au charbon pur on essaye de substituer des mélanges de plus en plus riches en sels métalliques. Ces charbons, introduits en 1900 par M. Bremer, ont été très étudiés et perfectionnés en France par notre confrère M. A. Blondel ; les charbons de M. Blondel, par exemple, sont formés d'un mélange de charbon et de matières minérales (en particulier fluorure de calcium additionné de borates alcalino-terreux) contenant jusqu'à 30 ou 60 0/0 de matières minérales ; ce mélange forme un cylindre central protégé par une mince couche de charbon pur ; on l'emploie comme pôle positif, et, à l'inverse des arcs ordinaires, on le place en bas ; le négatif, situé en haut, est formé par un crayon de charbon ordinaire.

Les principes physiques de ces arcs sont tout différents de ceux des arcs ordinaires. Dans ceux-ci, la véritable source de lumière (pour 85 0/0 du flux lumineux total environ) est non pas l'arc lui-même qui, malgré sa haute température, est peu éclairant, mais le cratère positif sur lequel se produit la base de l'arc et dont la température n'est limitée que par la température d'ébullition de la substance qui forme l'électrode : on cherche donc à élever cette température au maximum en choisissant le corps le plus réfractaire, c'est-à-dire le carbone.

Au contraire, dans le cas des charbons fortement minéralisés, les sels fusibles de chaux, par exemple, qui entrent dans leur composition, ont un point de volatilisation relativement bas, et la tem-

pérature du cratère devient très inférieure à celle des charbons ordinaires; mais alors l'arc lui-même est lumineux et constitue une véritable flamme très éclairante; grâce au pouvoir émissif de ces vapeurs, qui favorisent l'émission des rayons lumineux au détriment de celle des rayons obscurs, cette incandescence est plus avantageuse au point de vue du rendement que celle du charbon : aussi descend-on à des consommations spécifiques extrêmement faibles, 0,25 watt environ par bougie moyenne sphérique par exemple.

Parallèlement à ces recherches sur l'arc s'effectuent des recherches analogues sur la lampe à incandescence; la lampe Nernst a été la première tentative, réellement couronnée de succès, de substitution au charbon d'autres corps rayonnants ; ces corps sont des oxydes métalliques, ou conducteurs de deuxième classe, qui sont sensiblement isolants aux températures ordinaires, et ne deviennent conducteurs que lorsqu'ils ont été préalablement chauffés. Dans une autre voie, on a cherché à substituer au charbon des métaux à grand pouvoir réflecteur qui utilisent mieux que le corps noir l'énergie rayonnée : on se souvient que, bien avant la lampe à incandescence à filament de carbone dans le vide, on avait songé à utiliser le platine ; mais le point de fusion de ce métal était encore trop bas pour en utiliser convenablement l'incandescence; toutes les recherches récentes ont été dirigées en vue de trouver un métal rayonnant plus réfractaire encore que le platine : la lampe à osmium de Auer, la lampe à tantale de Siemens et Halske rentrent dans cette catégorie; on sait aujourd'hui préparer le tantale sous forme de fils étirés de cinq centièmes de millimètre de diamètre, qui peuvent être portés dans le vide à une température fort élevée sans fondre ; dans ces conditions, la consommation s'abaisse à 1,5 watt par bougie.

A cause de la grande conductibilité du métal employé, le filament de ces lampes doit avoir une longueur très considérable (650 millimètres pour une lampe de 25 bougies 110 volts) et être replié en zigzags pour tenir dans une ampoule de dimensions ordinaires.

Enfin nous devons signaler une lampe toute récente due à M. Canello et qui présente le plus grand intérêt : elle se compose d'un filament formé d'oxydes alcalino-terreux et recouvert d'une mince couche d'osmium métallique : elle participe donc à la fois de la lampe Nernst et de la lampe Auer.

Telle est, Messieurs, la vue d'ensemble que je désirais vous donner sur le développement actuel de l'électrotechnique ; deux caractères

essentiels s'en dégagent : la tendance constante vers la grandeur des résultats, et vers la simplicité des moyens d'action ; grandeur et simplicité, ce sont aussi les caractères des sources d'où tout est sorti, je veux dire des immortelles découvertes d'Ampère et de Faraday.

LES PROGRÈS RÉCENTS DE L'ÉLECTROCHIMIE (1) ;

Par M. Chaumat,
Sous-Directeur de l'École supérieure d'Électricité.

Le temps dont je dispose ne me permettrait pas de passer en revue toute l'industrie électrochimique actuelle, même en me bornant à une simple nomenclature. Il n'est, en effet, presque aucune partie du domaine de la chimie industrielle où l'électricité n'ait été appelée à jouer, sous une forme ou sous une autre, un rôle plus ou moins important.

D'autre part, un grand nombre d'industries électrochimiques sont aujourd'hui classiques : le raffinage du cuivre, la fabrication de l'aluminium, des chlorures décolorants, des chlorates, des alcalis caustiques et du chlore. Je me bornerai, dans cette revue des progrès récents de l'électrochimie industrielle, surtout aux applications du four électrique. C'est d'ailleurs là que se sont produits, dans ces dernières années, les progrès les plus remarquables.

Avant d'aborder cette étude, j'ai quelques réserves à faire au sujet du titre de cette conférence. Les usines électrochimiques sont en effet d'un accès très difficile, pour ne pas dire impossible. Pour des raisons sans doute très respectables, le mystère ne paraît pas moins nécessaire aux opérations des chimistes modernes qu'à celles des primitifs adeptes de la science hermétique. Dans ce qui va suivre, je n'ai guère pu faire état que des documents publiés et de quelques rares renseignements obtenus directement.

Il est intéressant de rechercher les raisons d'ordre général qui ont provoqué un essor si rapide de certaines industries électrochimiques. On peut dire que l'usine électrochimique se distingue :

1° Par une mise en œuvre de matières premières plus simples et plus directement utilisées ;

---

(1) Conférence faite le 2 mai 1905.

2° Par l'absence à peu près complète de sous-produits, et, comme conséquence, une économie de main-d'œuvre ;

3° Par un rendement bien meilleur.

Sur les deux premiers points, il n'est pas d'exemple plus remarquable que la fabrication du chlorate de potasse par voie électrolytique. A des réactions secondaires près, qui sont d'ailleurs sans grande importance, l'opération se réduit à la fixation de l'oxygène de l'eau sur le chlorure de potassium :

$$KCl + 3H^2O = ClO^3K + 3H^2.$$

Dans les anciens procédés, purement chimiques, les 5/6 du chlore de KCl étaient définitivement rejetés à l'état de chlorure de calcium.

Le nombre des industries chimiques dans lesquelles les sous-produits peuvent rentrer dans la fabrication sans une complication extrême de la main-d'œuvre est très restreint.

Sur le troisième point, on peut dire qu'une opération chimique a un rendement le plus souvent extrêmement faible. Prenons comme exemple la réduction d'un oxyde métallique par le charbon. Il est bien certain que, pour chaque atome de carbone qui brûle aux dépens de l'oxygène de l'oxyde, le rendement est de 100 0/0. Mais il y a autre chose. Pour provoquer la réaction, il a été nécessaire de chauffer le mélange pour l'amener à une température convenable : nous devons donc dépenser une quantité de charbon supplémentaire. De plus, le mélange est placé dans des récipients que l'on chauffe de l'extérieur ; la chaleur va être très mal utilisée.

Exemple : d'après les tables des données thermochimiques, pour la réduction de l'oxyde de zinc, il faut fournir

1.330 calories (kg.-degré) par kg. de zinc.

Dans la pratique, on compte sur une consommation de 10 kilogrammes de charbon par kilogramme de zinc produit. En admettant pour le charbon un pouvoir calorifique de 7.500 calories au kilogramme en moyenne, on trouve que la quantité de chaleur réellement fournie est 56 fois plus grande que la quantité théorique : le rendement ressort à 1,8 0/0. C'est faible, et l'on conçoit qu'on puisse demander à autre chose qu'à la combustion d'un charbon extérieur l'énergie nécessaire pour assurer la réaction, si cette énergie est mieux utilisée. C'est précisément ce que l'on demande au four électrique. Dans des expériences faites en 1903, à l'usine électro-

chimique de Crampagna (Ariège), pour la réduction de l'oxyde de zinc, le décompte de l'énergie consommée conduit à un rendement de l'ordre de 30 0/0.

Les caractères que je viens d'énumérer et des avantages nouveaux apparaîtront bien mieux si nous abordons l'étude du four électrique.

Fours électriques. — Le four électrique a été au début une enceinte réfractaire dans laquelle la matière à chauffer était soumise à l'action d'un arc électrique.

L'arc agit comme source purement thermique, et on peut l'alimenter soit avec du courant continu, soit avec du courant alternatif. Il n'y a guère que la seule exception du four à aluminium, où le métal est obtenu par l'électrolyse de l'alumine dissoute dans de la cryolithe fondue et où, par suite, le courant est nécessairement continu.

On peut reconnaître à l'emploi du four électrique les avantages suivants :

1° La température est plus élevée que dans les fours industriels. Les réactions y seront par suite plus complètes et, en raison même de l'élévation de la température, il sera possible de produire des réactions nouvelles. L'industrie du carbure de calcium en est un remarquable exemple, et nous en trouverons tout à l'heure un autre dans l'industrie des sels de baryte ;

2° La source de chaleur est intérieure ; le rendement sera, par suite, incomparablement meilleur. De plus, pour les réactions se produisant à très haute température, on évitera la détérioration rapide des récipients.

L'industrie du phosphore en est un exemple. On a réalisé une grande économie sur la casse des cornues par l'emploi du four électrique. De plus, on peut réduire directement les phosphates naturels et le phosphate tricalcique des os qu'il suffit de chauffer avec un mélange de sable siliceux et de coke. La fabrication préliminaire du phosphate acide de calcium est supprimée ;

3° La température très élevée permet, dans des opérations métallurgiques, la formation de scories fondues, faciles à séparer du métal. La possibilité de refroidir les parois autorise des compositions de scories, acides, basiques ou fluorées, très corrosives, qu'on ne peut admettre dans les fours métallurgiques ordinaires ;

4° Le réglage de la température est plus facile par un simple réglage électrique. On pourra par exemple surchauffer à un moment donné, pour une addition ou une coulée ;

3° Enfin, l'atmosphère n'est pas oxydante.

Les formes très nombreuses des fours modernes ne s'éloignent pas beaucoup du premier type de four industriel dit *four à carbure*, réalisé par M. Bullier, et qui comportait une électrode de charbon et une sole conductrice en charbon (Voir le schéma, *fig.* 1).

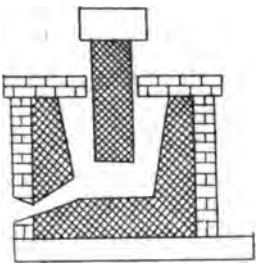


Fig. 1.

Les fours industriels modernes atteignent les dimensions suivantes : 1 mètre à 1m,50 de côté sur 1 mètre de profondeur. La puissance consommée y atteint de 500 à 600 kilowatts, et les courants y sont de 3.000 à 10.000 ampères.

On peut adopter, avec M. Keller, la classification suivante, basée tant sur le mode de fonctionnement que sur la forme.

1° *Fours à arcs.* — L'arc jaillit au-dessus de la matière à chauffer entre deux électrodes ou entre deux séries d'électrodes en parallèle (*fig.* 2), ou bien encore entre une électrode et une masse fondue con-

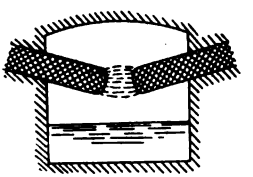


Fig. 2.

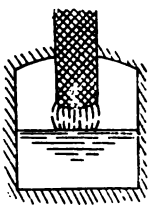


Fig. 3.

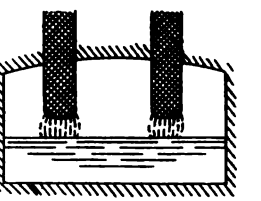


Fig. 4.

ductrice (*fig.* 3), ou enfin on peut avoir deux électrodes assez éloignées l'une de l'autre et deux arcs en série entre chaque électrode et la masse conductrice (*fig.* 4).

Ces fours ne conviennent pas à la réduction des minerais ; ils sont,

au contraire, très bien appropriés à l'affinage d'un bain métallique, en raison de la nécessité d'une nappe fondue facilement accessible pour les prises d'échantillons et les additions.

2° *Fours à résistance.* — Les électrodes sont dans la masse de la matière à traiter, qui constitue un conducteur simplement chauffé par le passage du courant. Ces fours conviendront à la réduction des minerais. Parfois on dispose une âme conductrice entre les électrodes quand la matière à traiter n'est pas elle-même conductrice, au moins à froid.

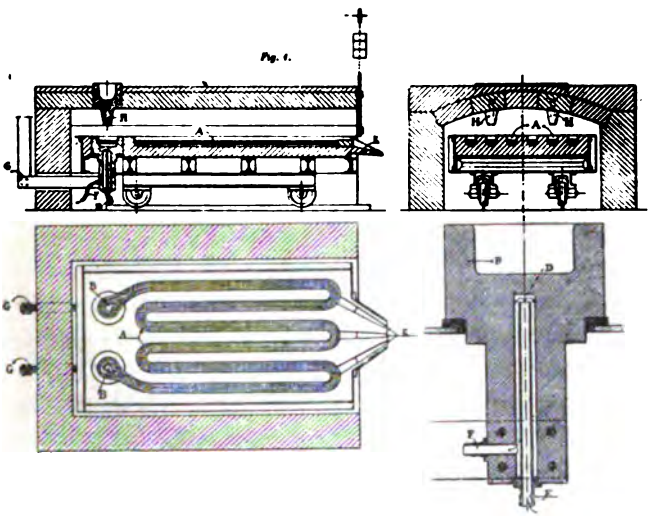


Fig. 5. — Four Gin. — A, creuset-canal ; B, B, blocs d'acier refroidis par une circulation d'eau, formant prise de courant ; G, G, conducteurs d'amenée du courant. Au moment du fonctionnement, le creuset, porté par un chariot, est disposé sous une voûte portant les entonnoirs H, H, par lesquels on verse la fonte liquide. On ajoute une proportion calculée de riblons ; puis, quand le mélange est bien fondu, on charge du minerai à la pelle par petites portions en suivant les progrès de la décarburation (1).

Parfois c'est le bain métallique à traiter qui sert de conducteur : on est alors gêné par la trop grande conductibilité du métal. C'est ce qui a conduit M. Gin à imaginer un four où le métal à traiter est contenu dans un canal de grande longueur et de faible section (*fig.* 5).

3° *Fours à résistance superficielle.* — La faible résistivité des bains métalliques fondus (de l'ordre de 200 microhms-centimètres) a con-

(1) Cette figure est empruntée au *Bulletin technologique de l'Association des Anciens Elèves de l'École Nationale des Arts et Métiers.*

duit à produire l'effet Joule dans la couche de laitier plus résistant située à la partie supérieure. On obtient ainsi les fours à résistance superficielle. On peut d'ailleurs, en soulevant les électrodes, obtenir un fonctionnement en four à arc.

4° *Fours à induction.* — Enfin il existe un quatrième type de fours sans électrodes. Ils servent à l'affinage. Nous les retrouverons en parlant de la fabrication des aciers. Leur capacité ne peut être aussi grande que celle des fours précédents, pour des raisons d'ordre électrique.

Matériaux des fours. — Les fours sont : en *charbon* pour la fabrication du carbure de calcium et des fontes spéciales autres que le ferrochrome ;

En *minerai de chrome* pour la fabrication du ferrochrome ;

En briques de *dolomie* pour les fours à acier ;

Ou constitués par des *mélanges* de charbon avec de la chaux, de le magnésie. du minerai de chrome, etc., suivant les usages. Ces mélanges sont le plus souvent moulés en briques que l'on cuit.

Les électrodes sont toujours en charbon.

Fabrication des électrodes. — La fabrication des électrodes est devenue une industrie importante. La seule usine de Notre-Dame-de-Briançon en fabrique annuellement plus de 1.000 tonnes. Mais, le plus ordinairement, les industriels fabriquent eux-mêmes leurs électrodes.

Du charbon de cornues, des cokes, des débris d'électrodes ou de vieux fours sont finement broyés et malaxés avec une petite quantité de brai. On obtient une pâte que l'on moule sous pression et que l'on soumet à une cuisson progressive.

Les électrodes ont le plus généralement la forme de parallélipipèdes de section carrée de 30, 40 et même 50 centimètres de côté.

On peut fabriquer de même des briques de charbon, des soles de charbon ou des fours complètement en charbon.

Parfois on sacrifie la durée en cherchant à obtenir un prix de revient aussi faible que possible. Les objets sont moulés à l'aide de vérins à bras ou même simplement damés.

Le plus souvent on cherche à faire durer les électrodes ou les fours en les fabriquant mieux. Le moulage est fait à l'aide de presses hydrauliques très puissantes.

La cuisson des électrodes est menée d'une façon très progressive jusqu'à 1.200°. L'opération dure huit jours.

A l'usine de la Praz, en Maurienne, le four à cuire les électrodes, de 70 mètres de long,, est à marche continue. Il est rempli d'une file

ininterrompue de vagonnets portant des boîtes à sable qui contiennent les objets à cuire. Il est chauffé dans sa partie centrale par des gaz de gazogènes. A des intervalles réguliers, on introduit à l'une des extrémités du four un wagonnet nouveau qui est poussé par une presse hydraulique et fait sortir un wagonnet à l'autre extrémité du four. Les gaz suivent une marche inverse.

Les électrodes ainsi obtenues sont denses, sonores. Leur conductibilité et leur durée dépendent de la compression initiale.

On obtient des résultats bien meilleurs encore par l'emploi des électrodes graphitisées.

Production du graphite. — Dès 1895, MM. Girard et Street avaient montré qu'en portant le carbone amorphe à très haute température par l'arc électrique on le transforme plus ou moins complètement en graphite. La pièce à graphitiser défile entre deux arcs en série. C'est leur procédé qui est appliqué à Levallois par la Société Le Carbone [1].

On peut se contenter, quand la forme des pièces s'y prête — et c'est le cas des électrodes — de les porter elles-mêmes au rouge blanc par l'action d'un courant électrique, en vase clos ou sous une couche de poussier. On admet une densité de courant de 30 ampères par centimètre carré ; quelques heures sont nécessaires pour la transformation complète.

MM. Girard et Street avaient remarqué qu'on obtenait de bien meilleurs résultats en employant, au lieu de charbon pur, un charbon contenant 2 0/0 de silice, d'acide borique ou de fer porphyrisé.

Une étude attentive des circonstances de formation du graphite dans son four à carborundum a montré à M. Acheson que cette formation était due à la production préalable d'un carbure qui se dissocie ultérieurement. La réaction se fait de proche en proche, et il est inutile d'employer la quantité de métal nécessaire pour la combinaison de tout le carbone. On fait une pâte de

97 parties de carbone finement divisé,
3 parties d'oxyde de fer ;

on moule et on porte les pièces à une température très élevée dans

[1] Voir le mémoire de M. Ch. Street dans le *Bulletin de la Société internationale des électriciens* de mai 1895.

un cylindre de charbon traversé par un courant électrique, dont on rend l'action très progressive.

Les électrodes ainsi traitées sont bien plus denses; leur densité est de 2,25 au lieu de 1,5 à 1,9 des électrodes ordinaires.

Elles ne contiennent pas plus de 1/1000 d'impuretés, pas traces d'hydrocarbures.

Elles sont très résistantes au chlore, et on peut les utiliser comme anodes dans l'électrolyse des chlorures alcalins; elles commencent à se substituer aux anodes de platine.

La durée des électrodes de graphite est au moins 6 fois plus grande que celle des électrodes de carbone amorphe pour l'électrolyse des chlorures alcalins. Elles se désagrègent cependant à la longue, et il se forme du carbone flottant qui souille les bains. On retarde cette désagrégation des électrodes en les rendant moins poreuses. A cet effet on les paraffine dans la masse.

Les électrodes graphitisées ne paraissent pas résister mieux que les autres quand on les emploie comme anodes insolubles pour l'électrolyse des sulfates en solution aqueuse.

Elles résistent aussi très bien à l'oxygène; le carbone amorphe brûle de 370 à 385°; le graphite, à 660; aussi s'usent-elles beaucoup moins vite dans les fours où l'on réduit un mélange d'un oxyde métallique et de charbon; l'oxygène de l'oxyde se combine plus facilement au carbone du mélange qu'à celui des électrodes.

La résistivité du carbone amorphe est d'environ 3.200 microhms-centimètres; celle du graphite, de 700 à 850. Les électrodes graphitisées sont donc 4 fois plus conductrices. Par conséquent, à échauffement égal et pour les mêmes dimensions, on peut admettre un courant double. Mais on va plus loin, puisque les électrodes graphitisées ne s'oxydent qu'à une température plus élevée.

Aussi, pendant qu'on admet seulement 5 ampères par centimètre carré dans les électrodes cuites à 1.200°, on ne craint pas d'aller jusqu'à 20 dans les électrodes de graphite.

Il y a mieux. Le graphite se travaille au tour mieux que le fer le plus doux. On peut assembler entre elles des pièces filetées et séparer l'électrode en un support permanent et une électrode ouvrière qu'on pourra utiliser presque sans déchets (*fig.* 6). En vue d'assurer en effet la durée des supports métalliques qui soutiennent les électrodes et servent à l'amenée du courant, on ne peut approcher ces supports très près du foyer. C'est pour cela qu'on était autrefois

obligé de rejeter des bouts assez longs. Ces bouts n'étaient pas perdus ; ils servaient à la fabrication d'électrodes nouvelles. Mais la main-d'œuvre était irrémédiablement perdue.

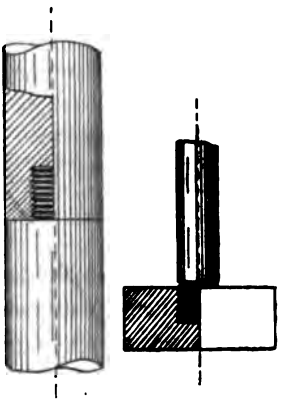


Fig. 6.

Il est difficile de fabriquer des électrodes graphitisées de très grande section, à cause des courants formidables qui seraient nécessaires et qui deviendraient d'un maniement très pénible.

Aussi, pour obtenir la section nécessaire, on associe entre elles, en parallèle, plusieurs électrodes de graphite. Elles sont vissées dans une même tête de graphite et les intervalles sont remplis d'un mélange de graphite granulé et de brai que l'on dame ou que l'on moule sous pression. L'ensemble est ensuite porté au four (1).

Nous connaissons maintenant le matériel, et nous allons passer en revue quelques industries intéressantes que j'étudierai dans cet ordre :

Fabrication des corps durs ;

Industrie des composés alcalino-terreux ;

Industrie des fers, aciers, fontes spéciales ;

(1) On fabrique non seulement par le four des objets graphitisés, mais du graphite granulé en chauffant pendant plusieurs heures de l'anthracite au moyen d'un courant électrique sous une couche de poussier. Le carbone forme avec les éléments de la cendre des carbures qui se dissocient ultérieurement par une élévation de température. Les impuretés sont éliminées à l'état de vapeurs.

Ce graphite en poudre est employé comme pigment pour la peinture d'ouvrages métalliques, et en qualité de lubrifiant comme succédané de la plombagine naturelle.

Fabrication des mattes cuivreuses.

Fabrication des corps durs. — *Carborundum*. — En réduisant à très haute température de la silice par du charbon, Acheson a obtenu, en 1891, un siliciure de carbone répondant à la formule SiC, qu'il a appelé carborundum. J'en rappelle rapidement la préparation et les propriétés.

On fait un mélange de :

54	parties de	sable pur.
34	—	coke pulvérisé.
10	—	sciure de bois.
2	—	sel marin.

La sciure de bois a pour effet de rendre la masse caverneuse et de faciliter le départ des gaz. La masse est tassée autour d'une âme de coke grossièrement granulé (grains de la grosseur d'une noisette), dans laquelle on fera passer un courant intense. C'est un four à résistance. La température doit y atteindre près de 3.500°.

On obtient ainsi, en très beaux cristaux, un corps infusible, incombustible, plus dur que l'émeri, qu'il peut remplacer dans tous ses usages. Il peut servir au polissage des diamants après la taille.

Il contient sensiblement 70 0/0 de silicium et 30 0/0 de carbone, et répond à la formule SiC.

On le pulvérise facilement et, en lui incorporant 30 0/0 d'argile, on en fait des meules que l'on cuit dans un four à poterie ordinaire.

Sa haute teneur en silicium le fait rechercher aujourd'hui dans la fabrication des aciers à la place du ferro-silicium. Il ne renferme en effet ni soufre ni phosphore.

Siloxicon. — En 1903, Acheson a obtenu, en réduisant la silice incomplètement à une température moins élevée (de 2.500 à 2.800°) et avec une quantité de carbone un peu moindre, un produit contenant du silicium, du carbone et de l'oxygène. C'est le siloxicon. Il se présente sous l'aspect d'une masse gris verdâtre, facile à pulvériser, s'agglutine avec de l'eau, se moule et se cuit comme une brique. On peut lui incorporer de l'argile.

Il se décompose à 3.500° pour donner du carborundum, mais résiste aux températures industrielles et n'est pas attaqué par les scories acides ou basiques et les métaux fondus. Il paraît par conséquent convenir très bien pour le garnissage des fours, creusets, convertisseurs employés dans les opérations métallurgiques.

Corindon. — En faisant passer un courant d'H sur du kaolin fondu au four électrique, on obtient de la vapeur d'eau, du siliciure d'H (SiH^4) et un sous-silicate d'alumine. L'action se prolongeant, on peut même obtenir ainsi de l'alumine fondue (dureté 8 à 9 de l'échelle ordinaire).

SiH^4 brûle à l'orifice du four en donnant de la silice sous forme de poussière extrêmement ténue qui peut servir au polissage des métaux fins.

Le sous-silicate d'alumine et l'alumine ainsi obtenus sont des matières très dures.

Le corindon artificiel peut aussi s'obtenir au four électrique par simple fusion d'alumine amorphe, de bauxite par exemple.

L'intérêt de cette fabrication est l'obtention d'un produit très homogène. Le corindon naturel n'est pas un produit très répandu, et il ne se trouve pas toujours dans le voisinage des centres d'utilisation.

Composés alcalino-terreux. — Je laisse de côté le carbure de calcium, dont la préparation et les propriétés sont aujourd'hui bien connues. Les grandes espérances qu'on avait fondées sur ce corps ne se sont pas réalisées immédiatement, et la production en France n'utilise pas actuellement le quart de la puissance des usines qui avaient été créées dans ce but spécial (la production en 1902 a atteint 12.000 tonnes, en France).

Mais c'est à cette crise, qui a pesé longtemps sur l'industrie du carbure, que l'on doit des recherches très nombreuses et la création d'industries nouvelles.

Siliciures alcalino-terreux. — Les siliciures alcalino-terreux, préparés pour la première fois en 1899 par la Ampère Electro-Chemical Company, ont même composition que les carbures :

$$CaSi^2,\ BaSi^2,\ SrSi^2.$$

On les produit au four en réduisant des mélanges d'oxydes, carbonates, sulfates des métaux alcalino-terreux et de silice en proportion théorique (2 atomes de Si pour 1 de métal), par la quantité de carbone juste suffisante pour la réduction.

On peut aussi réduire des silicates alcalino-terreux par le charbon si, dans ces silicates, il y a 1 atome de métal pour 2 de silicium.

Ils se produisent à une température un peu plus élevée que le carbure de calcium.

Ce sont des corps blancs ou blanc bleuâtre, à structure cristalline.

Ils s'oxydent lentement dans l'air à la température ordinaire, plus rapidement à chaud.

Ils décomposent l'eau en donnant un abondant dégagement d'hydrogène pur.

Le $CaSi^2$ décompose lentement l'eau froide, plus rapidement l'eau chaude.

Le $BaSi^2$ décompose rapidement l'eau froide et l'eau chaude.

Le $SrSi^2$ est intermédiaire.

1 kilogramme de siliciure de	calcium	dégage	1.169	litres	d'hydrogène
1 —	strontium	—	772	—	
1 —	baryum	—	571	—	

Ce dernier composé — en raison de l'abondance du baryum dans la nature et de la facilité de la réaction — fournit à l'heure actuelle le procédé le moins coûteux pour la préparation de l'hydrogène pur (1).

Les siliciures alcalino-terreux sont de puissants agents de réduction. Si, dans une pâte claire d'indigo bleu et d'eau, on introduit du siliciure de baryum finement pulvérisé, on obtient instantanément une solution d'indigo blanc.

Ils pourront sans doute rendre de grands services en chimie organique pour les réductions en solutions neutres.

Sous l'action des acides dilués, le siliciure de baryum donne un

---

(1) Il est intéressant de mettre en regard un procédé de préparation de l'oxygène tout aussi commode et dont on doit également la mise au point industrielle à l'électrochimie.

On prépare depuis quelques années de grandes quantités de sodium métallique, en particulier aux chutes du Niagara et dans la vallée de la Romanche. Ce sodium est obtenu par l'électrolyse de soude caustique fondue à une température aussi basse que possible dans un vase de fer servant de cathode. Des anodes de même métal plongent dans la masse. Le sodium métallique monte à la surface et on le recueille à l'aide de cuillères de fer (la température est assez basse pour que le sodium ne s'enflamme pas).

Le sodium métallique est en grande partie transformé sur place en peroxyde de sodium par l'action de l'air sec et chaud.

Le peroxyde de sodium est utilisé à la préparation de l'eau oxygénée par son action sur de l'eau acidulée par SO^4H^2 et refroidie avec de la glace.

Sous le nom d'oxylithe, l'usine des Clavaux (vallée de la Romanche) prépare un peroxyde de sodium qui dégage de l'oxygène sous l'action de l'eau froide, environ 100 litres au kilogramme. Ce produit n'est pas du peroxyde de sodium pur. On dit que c'est un mélange de peroxyde de sodium et de permanganate (?). Il semble contenir de petites quantités d'oxydes qui favorisent sa décomposition.

Notons que les récipients qui servent au transport de l'oxygène comprimé à 120 ou 150 atmosphères ont un poids mort qui est 10 fois celui de l'oxygène, soit 1kg.400 par 100 litres. Le rapprochement est intéressant.

dégagement d'hydrogène et de siliciure d'hydrogène. Le siliciure de calcium donne une réaction toute particulière :

$$CaSi^2 + 2HCl = CaCl^2 + Si^2H^2.$$

Le siliciure de strontium participe des deux réactions précédentes.

Le corps nouveau qui se forme, homologue de l'acétylène, a été appelé *silico-acétylène*. C'est un corps solide, jaune, qui donne avec les bases un silicate et un dégagement d'hydrogène. Ce sera un agent réducteur énergique en solutions alcalines.

Les siliciures alcalino-terreux sont des agents de désulfuration et de déphosphoration énergiques qui en feront peut-être de précieux auxiliaires dans la métallurgie du fer et de l'acier. Fondus avec du fer contenant du soufre et du phosphore, ils forment des sulfures et phosphures alcalino-terreux ; le silicium se dissout dans le métal. Une insufflation d'air dans la masse fait passer les sulfures et phosphures à l'état de phosphates, de sulfates, et le silicium brûle. L'élimination des impuretés paraît complète.

Industrie des sels de baryte. — Voici un exemple remarquable des qualités du four au point de vue de l'achèvement des réactions qui nécessitent une température élevée.

On sait que, pour fabriquer les sels de baryte, on réduit le sulfate de baryte naturel par le charbon (houille ou coke) dans des fours à réverbère. On ne peut guère convertir en sulfure de baryum soluble que les 70 0/0 du sulfate primitif.

En employant le four électrique, on arrive à transformer de 97 à 99 0/0 de sulfate de baryte.

Le procédé, employé en grand aux chutes du Niagara par la « United Baryum Company », a fait découvrir une réaction nouvelle qui se produit à des températures qu'on ne peut atteindre dans les fours à combustion. Quand on fond ensemble du sulfate de baryte et du sulfure de baryum, la réaction suivante se produit :

$$3BaSO^4 + BaS = 4BaO + 4SO^2.$$

La réaction n'est pas aussi complète que la précédente, sans doute à cause de l'inégale fusibilité des deux produits. Pratiquement on mêle le sulfate de baryte avec une quantité de charbon suffisante pour en réduire environ le quart à l'état de sulfure, et on chauffe le

mélange au four électrique. Le produit coulé renferme :

60 0/0 oxyde de baryum,
40 0/0 sulfure de baryum.

On lessive les blocs et on met à cristalliser ; on obtient directement de l'hydrate de baryte cristallisé. Le sulfure de baryum des eaux mères sert à préparer d'autres sels de baryte.

L'usine du Niagara fabriquait déjà, en 1902, 60 tonnes par jour d'hydrate de baryte cristallisé, dont le prix est tombé au quart de sa valeur. Il a trouvé immédiatement des débouchés, dont l'écartait autrefois son prix, notamment dans la fabrication des peintures blanches, l'épuration des eaux industrielles et surtout la récupération du sucre des mélasses de betterave.

Dans cette dernière industrie, on compte que l'hydrate de baryte permet de récupérer son propre poids de sucre cristallisé.

Cette baryte n'est pas perdue ; on la retrouve dans les écumes à l'état de carbonate. A l'usine de Foligno, en Italie, appartenant à la Société des Carbures et Dérivés, ce carbonate de baryte est traité au four pour la production de carbure de baryum. L'acétylène finalement obtenu est utilisé sur place à la fabrication de noir de fumée.

Métallurgie du fer et de ses dérivés. — Le haut fourneau est devenu un appareil si parfait et si bien adapté à son but que ce n'est pas dans la fabrication de la fonte que le four électrique est actuellement employé. On l'utilise surtout à la fabrication de l'*acier* et à l'obtention de certaines fontes spéciales connues sous le nom générique de ferros.

Fonte. — Cependant, depuis les travaux du métallurgiste italien Stassano, travaux qui datent de 1898, on sait faire de la fonte électriquement.

Dans une opération métallurgique au haut fourneau ordinaire, on demande au carbone un double rôle : 1° la réduction du minerai, et 2° par sa combustion propre, le dégagement de chaleur nécessaire à la possibilité des réactions.

On compte ordinairement, pour obtenir une tonne de fonte, une dépense de 1 tonne de coke, dont 350 kilogrammes seulement pour la réduction.

Dans le haut fourneau électrique, on demande à l'énergie électrique le dégagement de chaleur nécessaire pour provoquer les réac-

tions. Il est facile de se rendre compte que la substitution ne sera économiquement possible que dans des cas exceptionnels.

Avec M. Keller, nous admettrons une dépense en énergie électrique de 1 kilowatt-an de 8.400 heures pour obtenir 4 tonnes de fonte, plus une dépense de 350 kilogrammes de coke par tonne pour la réduction. Si K est le prix du kilowatt-an et si l'on admet pour le prix de la tonne de coke :

20 francs à l'usine métallurgique;

35 francs à l'usine hydroélectrique, à cause des frais de transport supplémentaires, la dépense de ces deux chefs sera :

$$\frac{K}{4} + \frac{35 \times 350}{1000}.$$

Si nous admettons d'autre part l'égalité des frais de main-d'œuvre et d'entretien et que la consommation des électrodes soit compensée par les frais de soufflage, l'équation de possibilité sera :

$$\frac{K}{4} + \frac{35 \times 350}{1000} \leq 20.$$

Ce qui donne $K \leq 32$ francs.

Ceci n'est réalisé qu'exceptionnellement. On cite en France comme détenant un record mondial l'usine hydroélectrique à chlorate de Chedde, où le coût de l'installation n'a pas dépassé 190 francs par kilowatt et où le prix de revient du kilowatt-an aux bornes des génératrices est de 30 francs.

Malgré cette condition prohibitive, la fabrication électrique de la fonte a été installée à l'usine de Kerrousse, près de Hennebont (Morbihan), par la Compagnie électrochimique qui exploite les brevets Keller.

Le haut fourneau Keller (*fig.* 7) présente un tronc de cône central pour la descente des charges au centre du creuset situé à la partie inférieure. Au-dessus du creuset sont disposées, aux quatre sommets d'un carré, quatre électrodes verticales couplées par deux en parallèle et deux en tension.

Au début, on met sur la sole en maçonnerie une couche de matières conductrices telles que scories ou riblons, on descend les quatre électrodes au contact ; on les relève ensuite progressivement.

Au moment de la coulée, on abaisse les deux électrodes les plus éloignées du trou de coulée et on relève les deux autres. Le four, qui

fonctionnait jusqu'alors comme four à résistance, en prenant 25 à 30 volts par foyer, marche maintenant en four à arc ; deux arcs longs très chauds se produisent et rendent tout à fait fluide le bain métallique.

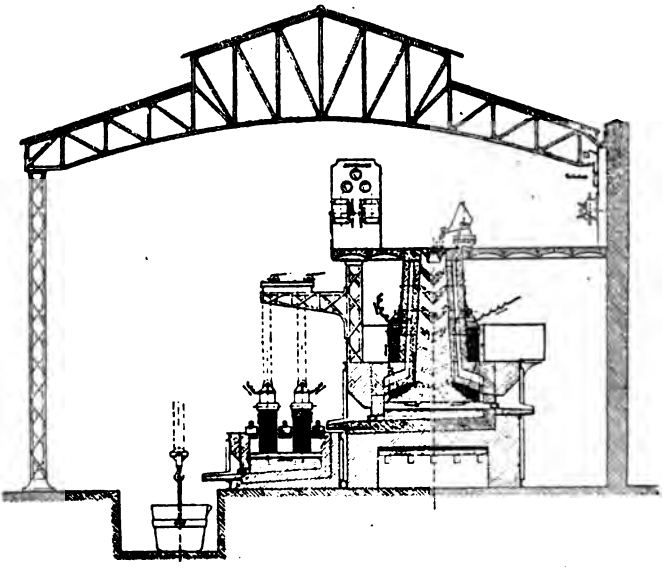


Fig. 7. — Haut fourneau électrique Keller. — Le four d'affinage dans lequel s'élabore l'acier est situé en contre-bas et reçoit la fonte liquide provenant du haut fourneau proprement dit (1).

Un four à affinage situé en contre-bas et sur lequel nous reviendrons tout à l'heure reçoit la fonte liquide.

Dans certains pays, éloignés des centres de production des cokes métallurgiques, et où se trouvent dans les régions minières des chutes d'eau d'un aménagement facile, le problème de la fabrication électrique de la fonte pourra certainement être abordé avec les chances économiques les plus sérieuses. C'est le cas du Brésil, où le coke anglais revient à 60 francs la tonne, et du Chili, où il revient à 100 francs en certains points.

Aciers. — La fabrication des aciers au four électrique est un autre problème. Tous les avantages du four sont ici précieux et surtout l'absence d'atmosphère oxydante qui permettra l'élaboration plus ra-

(1) Les fig. 7. 8 et 9 sont empruntées à l' « Electro-Sidérurgie » de la *Bibliothèque du Mois Scientifique et Industriel.*

pide du métal définitif. On n'aura pas à craindre non plus la perte par oxydation des matériaux qui servent aux additions finales en vue de l'obtention d'aciers spéciaux.

Le prix de l'énergie n'intervient lui-même que pour peu de chose.

M. Keller estime, d'après ses expériences, à 850 kilowatt-heures environ l'énergie nécessaire pour fondre et affiner une tonne d'acier. En se plaçant dans les conditions très défavorables d'un prix de revient du kilowatt-an de 400 francs (usine à vapeur), c'est une dépense de 40 francs par tonne d'acier.

Dans une expérience faite à l'usine de la Praz par M. Héroult, à l'occasion du Congrès de la Houille Blanche, en septembre 1902, on a obtenu une consommation en énergie du même ordre. On avait pris comme point de départ de la fonte et des riblons froids. La réaction a duré de sept à huit heures et, avec une puissance moyenne de 400 chevaux, on a obtenu 2.200 kilogrammes d'acier.

Four Héroult. — M. Héroult a le premier obtenu l'acier électrique par coulées de 2.000 à 2.500 kilogrammes. Le four Héroult (*fig.* 8) est une demi-cuve cylindrique en tôle d'acier de 2m,50 de long. L'intérieur est revêtu de briques de dolomie. Il possède un couvercle de briques siliceuses au travers duquel passent par deux ouvertures carrées deux électrodes. C'est un four à arc, et il y a deux arcs en série, le bain servant de conducteur intermédiaire.

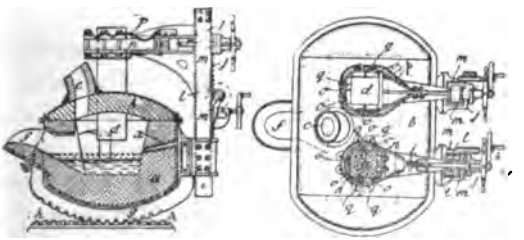


Fig. 8. — Four a acier Héroult.

Sur les plans des bases se trouvent deux portes de chargement. On peut charger aussi par le trou de coulée situé au milieu d'une génératrice.

Le four roule sur un plan poussé au moment de la coulée par un appareil hydraulique.

On y traite un mélange de riblons, de castine et de fonte: on fait

fondre par l'arc, on ajoute du minerai qui oxyde tous les métalloïdes et en *dernier lieu* le carbone. Après quatre ou cinq heures, on lave avec de la castine et on coule le laitier. On obtient à ce moment un acier extra-doux, même légèrement oxydé.

On le recarbure à l'aide de fontes très carburées et on ajoute à cet instant des ferros pour les aciers spéciaux.

L'élaboration de l'acier dans le four Héroult tient le milieu entre les deux procédés par dilution et oxydation de la fonte par le minerai, connus en métallurgie sous les noms de *scrap process* et d'*ore process*.

Le four Héroult est alimenté par du courant alternatif.

Il consomme 4.000 ampères sous 60 volts et peut produire 6 à 7 tonnes d'acier par vingt-quatre heures.

Depuis l'origine du procédé (1900), M. Héroult a fabriqué plus de 15.000 tonnes d'acier.

On installe en ce moment en Suède, près de Kortfors, des fours de ce type, mais d'une puissance de 450 kilowatts.

Four Keller. — Le four à affinage Keller est basé sur le même principe. C'est une cuve parallélipipédique à parois de dolomie et à enveloppe métallique. Les électrodes ne plongent pas dans le laitier, et, comme dans le four Héroult, il y a deux arcs en série. Les électrodes sont réglées indépendamment à la main (*fig*. 7). L'affinage de la fonte y est mené comme au four Martin par la méthode de l'ore process.

Four de Gysinge. — C'est un four d'un type très remarquable, sans électrodes. Inventé par Kjellin et Benediks, il a été mis en essai à Gysinge (Suède), depuis février 1900 (*fig*. 9).

C'est un transformateur dont le primaire est alimenté par de la haute tension (3.000 volts). Le secondaire ne comporte qu'une seule spire. Il est constitué par le métal même du creuset, qui a la forme d'un canal circulaire creusé dans un bloc de matière réfractaire disposé en couronne. Ce secondaire, constamment fermé sur lui-même, est traversé par un courant très intense qui amène rapidement le métal à l'état liquide. Le réglage de l'intensité et le surchauffage se font avec la plus grande facilité par le réglage de la tension. On n'a pas les ennuis de maniement des courants formidables des fours ordinaires.

Le premier type, installé en 1900, donnait 80 kilogrammes de métal par opération.

Depuis 1902, on en a mis en service un autre qui contient 1.800 kilogrammes de matière et peut fournir 4.100 kilogrammes d'acier en vingt-quatre heures avec 165 kilowatts. On ne vide jamais le four complètement et on ne retire à chaque coulée que 1.000 kilogrammes de métal.

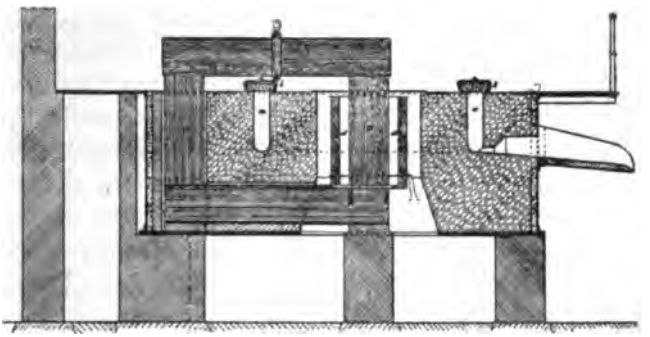


Fig. 9. — Four a induction de Gysinge. — *aa*, creuset formant, quand il est rempli de fonte, le secondaire à une seule spire d'un transformateur ; *c*, circuit magnétique du transformateur ; *dd*, circuit d'alimentation à haute tension.

On ne traite que de la fonte brute et des riblons. On obtient d'excellents aciers très pauvres en gaz, qui peuvent soutenir la comparaison avec les meilleurs aciers au creuset et qui sont même supérieurs comme résistance à la rupture.

Prix de revient. — D'après M. Keller, le prix de revient de la tonne d'acier fini en partant du minerai serait d'environ 100 francs la tonne. Cette évaluation est faite en supposant qu'on dispose de minerais de fer peu coûteux (minerai de fer à 55 0/0 rendu à l'usine à 10 francs la tonne) et que l'aménagement de la puissance hydraulique se présente dans des conditions extrêmement favorables qui ne se sont rencontrées jusqu'ici que tout à fait exceptionnellement.

M. Keller compte en effet le kilowatt-an de 8.400 heures à 50 francs, tous amortissements compris, et il admet une consommation de 2.800 kilowatt-heures par tonne d'acier fini. Cette consommation est inférieure à celle qui résulte des chiffres précédemment donnés pour la fonte et l'acier, parce que, dans cette dernière estimation, on part du minerai et qu'on évite de fondre à nouveau la fonte.

En Allemagne, où le minerai coûte le double et où l'énergie électrique est produite par des moteurs à gaz, on arriverait à un prix

de 200 francs environ par tonne. Dans ces conditions, on préfère travailler au four Martin, beaucoup plus économique.

Le procédé Kjellin, suivant une estimation donnée par M. Goldschmidt à la Société allemande Bunsen en 1903, conduirait à un prix de revient plus élevé encore de 215 francs par tonne. Il est vrai que là on cherchait à obtenir des produits aussi parfaits que possible et que l'on choisissait comme point de départ des matériaux très purs.

La conclusion semble être à l'heure actuelle que, en raison de la grande pureté de l'acier électrique et en admettant des conditions d'installations ordinaires, il soit possible aux usines électrosidérurgiques de concurrencer sérieusement l'acier au creuset, dont le prix de revient serait voisin de 375 francs la tonne.

Mais, si l'avenir du four électrique paraît très limité pour l'obtention des aciers courants, il n'en est plus de même si on le fait servir à la fabrication des fontes spéciales.

Les ferros. — Ces fontes spéciales, qui servent dans la métallurgie actuelle de l'acier fondu aux additions finales, sont surtout le ferromanganèse, le ferrosilicium, le ferrochrome et le ferrotungstène.

L'incorporation du silicium dans un bain d'acier fondu fait disparaître les soufflures et permet d'obtenir par moulage la forme définitive du premier coup sans qu'il y ait nécessité d'un forgeage ultérieur. On obtient de meilleurs résultats encore par l'emploi simultané du silicium et du manganèse. L'acier obtenu est plus doux et plus ductile.

On sait fabriquer depuis longtemps au haut fourneau ordinaire des *ferromanganèses* à haute teneur (titrant jusqu'à 80 et 85 0/0), et il n'y a pas eu intérêt à essayer des procédés électriques.

Ferrosilicium. — Le ferrosilicium est, au contraire, très difficile à obtenir au haut fourneau ordinaire à des teneurs un peu fortes. On ne dépasse pas 10 à 15 0/0. L'allure doit être très chaude et on consomme 3 tonnes de coke pour 1 tonne de ferrosilicium titrant 10 à 15 0/0, soit trois fois plus que pour 1 tonne de fonte ordinaire.

Le four électrique permet d'obtenir, à cause de la température plus élevée, des produits plus purs et plus riches titrant de 20 à 80 0/0.

On traite des mélanges convenablement dosés de:

Quartz (de préférence au sable).
Déchets de fer (qu'on préfère aux minerais à cause des absences de laitiers) et de coke ou anthracite.

Une tonne de ferrosilicium à 30 0/0 exige 3.500 kilowatt-heures.

Cette fabrication se fait surtout à l'usine de la Praz (four à arc à sole graphitique) et à l'usine de Livet où les fours du type à résistance absorbent 650 chevaux.

Ferrochrome. — Le ferrochrome sert pour l'obtention des aciers chromés utilisés pour la fabrication des blindages et des projectiles.

La fabrication au haut fourneau ordinaire est très difficile et très coûteuse. Elle a été une spécialité de Commentry.

On le fabrique aujourd'hui presque uniquement au four électrique et par le procédé de Hans Goldschmidt, qui a créé, dès 1897, sous le nom d'aluminothermie, toute une métallurgie nouvelle.

On traite au four un mélange de minerai de chrome (fer chromé), d'anthracite et de chaux; on ajoute parfois un peu de bauxite pour faciliter la fusion du laitier.

On obtient ainsi des produits contenant 60 0/0 de chrome et 2 à 10 0/0 de carbone. Le prix est en raison inverse de la teneur en carbone.

587 francs la tonne	pour	10 0/0 de C
1.000 —		4 0/0 —

Aussi a-t-on avantage à obtenir un produit aussi peu carburé que possible.

Les premiers fours à une électrode et à sole de graphite (type du four à carbure) donnaient un produit à 10 0/0 de carbone.

Les fours en minerai de chrome à deux électrodes donnent le produit carburé à 4 0/0.

On a employé aussi des fours à une électrode et à sole conductrice formés d'un mélange de graphite et de minerai de chrome.

Le ferrochrome est très peu fusible, et le four doit être parfois sacrifié.

On le fabrique à la Praz, à l'usine d'Epierre, et surtout à Albertville, où M. Paul Girod s'est fait une spécialité de cette fabrication.

Le laitier est une chaux hydraulique à prise lente de bonne qualité qu'on utilise.

Ferrotungstène. — Le ferrotungstène sert à obtenir des aciers spéciaux surtout employés à la fabrication des ressorts, des aimants, et surtout des outils travaillant à grande vitesse, et en général des pièces qui chauffent beaucoup.

L'acier au tungstène à 0,5 0/0 possède en effet la curieuse propriété de ne pas se détremper, même au rouge sombre.

On l'obtient d'une façon analogue au ferrochrome en prenant comme point de départ le wolfram (tungstate double de manganèse et de fer).

Le produit obtenu titre de 80 à 85 0/0 de tungstène. Il est très dense ($d = 19$), plus infusible encore que le ferrochrome, et à peu près impossible à couler. Son prix dépend de la teneur : on compte 4 francs par kilogramme de tungstène.

On obtient aussi par des procédés analogues des *ferrotitane*, *ferrovanadium*, *ferromolybdène*.

Le vanadium et le molybdène communiquent à l'acier très doux des résistances à la rupture très élevées.

Le vanadium, comme le tungstène, donne aux aciers durs (contenant de 1 à 1,5 0/0 de carbone) la possibilité de supporter de très hautes températures sans se détremper (usage pour les aciers à outils).

Production des mattes cuivreuses. — Des expériences très intéressantes ont été faites en 1903, devant une Commission de métallurgistes, à l'usine de la Praz, puis à Kerrousse et à Livet, par M. Vattier, délégué du Gouvernement chilien. Le problème était le suivant :

Essayer d'obtenir, dans le voisinage de mines situées loin de la côte, — dans une région où le coke anglais revient à 100 francs la tonne, mais où se trouvent des chutes d'eau à débit régulier et d'un aménagement facile, — le premier terme de la métallurgie du cuivre, c'es-à-dire des mattes titrant de 40 à 50 0/0 de cuivre, à l'aide d'un minerai titrant 7 0/0 et provenant de la mine dite du « Volcan ». Le transport d'une matte riche est bien plus intéressant que le transport du minerai.

On s'est arrêté à la disposition suivante : un four de première fusion à arc où le minerai brut était directement introduit, et un avant-creuset fonctionnant comme four à résistance contenant deux électrodes réchauffeuses pour la séparation définitive de la matte et des scories. On commence avec quelques morceaux de charbon et des mattes.

Dimensions :

Fours : 1m,80 de longueur
— 0 ,90 de largeur
— 0 ,90 de hauteur
2 électrodes de 30 × 30 × 170

Avant-creuset : L = 1,20
— I = 0,60
— H = 0,60
2 électrodes 25 × 25

On a obtenu du premier coup un produit contenant 47,9 0/0 de cuivre.

Par l'emploi de fours à réverbère ordinaires, on compte que, pour une tonne de cuivre dans les mattes, il faut consommer 3,2 tonnes de coke, soit une dépense de 320 francs.

Dans le four électrique, pour la même tonne de cuivre, on a dépensé 10.640 kilowatt-heures, soit 38 francs d'énergie à 30 francs le kilowatt-an de 8.400 heures. Il convient d'ajouter une dépense de 75 kilogrammes d'électrodes (dont on peut estimer le prix de revient à 600 francs la tonne dans la région minière). C'est une dépense totale de 83 francs.

On évalue l'économie à 250 francs par tonne, au bas mot, surtout en raison d'autres avantages qui sont :

La suppression des ventilateurs ;

La possibilité de fondre des minerais plus réfractaires ;

L'utilisation directe des menus et poussières qui sont chargés à la pelle. On évite ainsi la main-d'œuvre considérable de l'agglomération de ces débris en briquettes pour les fours actuels.

Enfin, il est possible de traiter des minerais pauvres à 4 0/0 qu'on rejette aujourd'hui.

Note sur la fabrication et les emplois industriels de l'ozone. — Il m'a été donné de visiter tout récemment en détail l'usine de *la Société française de l'Industrie chimique*. Cette usine, située à Courbevoie, utilise l'ozone à la fabrication de certains parfums. C'est, dit-on, la seule usine de ce type au monde. On a bien voulu m'autoriser à vous communiquer les renseignements que j'ai pu recueillir sur place, et je ne saurais trop remercier ici, pour ce rare exemple, l'administrateur délégué de la Société de l'Industrie chimique.

On sait que l'ozone s'obtient en soumettant de l'oxygène, ou industriellement de l'air, à l'action de l'effluve. Une tension très élevée

est nécessaire, 10.000 volts au moins. Il y a une tension critique, variable avec la forme des ozoniseurs, et à partir de laquelle on obtient une *pluie de feu* caractéristique. A partir de là, la production d'ozone croît très rapidement avec la tension (comme le carré, a-t-on dit). Il semble aussi que le rendement croisse avec la fréquence, et, dans certains ozoniseurs, on emploie de véritables décharges oscillantes. Il y a un grand intérêt à opérer avec de l'air aussi froid que possible.

D'après les données thermochimiques, 1 kilowatt-heure devrait produire :

1.393 grammes d'ozone.

Les appareils industriels ne donnent qu'un rendement de 3 à 5 0/0.

On peut compter sur une production de 40 grammes d'ozone environ par kilowatt-heure, avec une teneur de 3 milligrammes au litre environ.

A 0 fr. 10 le kilowatt-heure, le kilogramme d'ozone revient à 2 fr. 50 environ. C'est deux fois et demie plus que la quantité équivalente de chlore, quatre fois moins que la quantité équivalente d'eau oxygénée. On voit qu'il suffirait d'une amélioration assez faible du rendement pour que l'ozone puisse lutter contre tous les oxydants industriels.

Même avec ce prix de revient élevé, l'ozone se recommande par l'énergie de son action, une grande facilité d'emploi et l'absence de sous-produits, de résidus difficiles à éliminer.

On emploie l'ozone :

1° Au blanchiment des tissus, de la cire, des fécules ;

2° Au vieillissement artificiel des liquides alcooliques ;

3° Au vieillissement des bois des instruments de musique (un séjour de douze à vingt-quatre heures dans une chambre contenant de l'air ozoné suffit pour donner au bois, par l'oxydation des matières résineuses, la sonorité que l'on recherche et qui ne s'acquiert spontanément qu'au bout d'un temps très long) ;

4° A la stérilisation des eaux potables ;

5° A la fabrication des parfums.

Stérilisation des eaux potables. — Le procédé de stérilisation des eaux potables par l'ozone a été imaginé par MM. Abraham et Marmier. Des expériences faites tout d'abord à Lille, en 1898-1899, devant une Commission de bactériologistes, puis à Paris, sous le contrôle de l'Administration de l'Assistance publique, ont montré que ce

procédé était le plus efficace que l'on pût employer pour la destruction des germes pathogènes. L'ozone n'apporte à l'eau aucun élément nuisible à la santé. L'eau reste fraîche; elle se trouve énergiquement aérée et n'est dépourvue d'aucun de ses éléments minéraux utiles.

L'eau ruisselle sur des matériaux inertes dans une sorte de tour de Gay-Lussac, dans laquelle de l'air ozoné à 6 milligrammes par litre circule de bas en haut.

La dépense n'excède pas un centime par mètre cube d'eau stérilisée.

Les procédés de MM. Abraham et Marmier sont actuellement employés par la ville de Cosne pour la totalité des eaux d'alimentation (100 mètres cubes à l'heure), par la brasserie de la Méditerranée, à Marseille, pour la totalité des eaux qui servent dans l'usine (20 mètres cubes à l'heure), et dans les mines du Boléo pour une puissance du même ordre [1].

Fabrication des parfums. — L'usine de Courbevoie utilise une puissance totale de 400 chevaux à la conduite de pompes, aspirateurs, machines à glace, et à l'alimentation d'une batterie de 200 ozoniseurs de chacun 1 mètre carré de surface environ. Deux alternateurs de 60 kilovolt-ampères produisent un courant alternatif à la fréquence 80 et sous la tension de 250 volts que des transformateurs élèvent à 12.000.

L'ozoniseur de la Société française de l'Industrie chimique est ainsi constitué : Une feuille d'aluminium (le métal commun qui résiste le mieux à l'action de l'ozone) repose horizontalement sur un bloc d'ardoise (*fig.* 10). A 3 millimètres au-dessus de cette lame, et maintenue à distance par de petites cales en verre, se trouve une lame de verre de 6 millimètres d'épaisseur sur la face supérieure de laquelle est collée une feuille d'étain carrée de 1 mètre de côté. Cette feuille d'étain et la lame d'aluminium constituent les deux armatures de l'ozoniseur, et l'effluve jaillit ainsi dans le petit espace d'air de 3 millimètres d'épaisseur. La lame d'aluminium et le bloc d'ardoise sont percés en leur centre d'un trou où aboutit le tuyau d'aspiration de l'air ozoné. L'air extérieur, refroidi par des blocs de glace disséminés dans la pièce, accède librement par les bords.

L'ozoniseur n'est pas alimenté directement par la haute tension. Au-dessus de l'ozoniseur se trouve un condensateur formé par deux

---

[1] On trouvera d'intéressants détails sur les appareils à ozone de M. Abraham dans le *Bulletin de la Société internationale des Electriciens* de novembre 1900.

feuilles d'étain de 60 × 60 centimètres collées sur les deux faces d'une lame de verre de 6 millimètres d'épaisseur. La feuille d'étain inférieure du condensateur est reliée par des supports d'aluminium

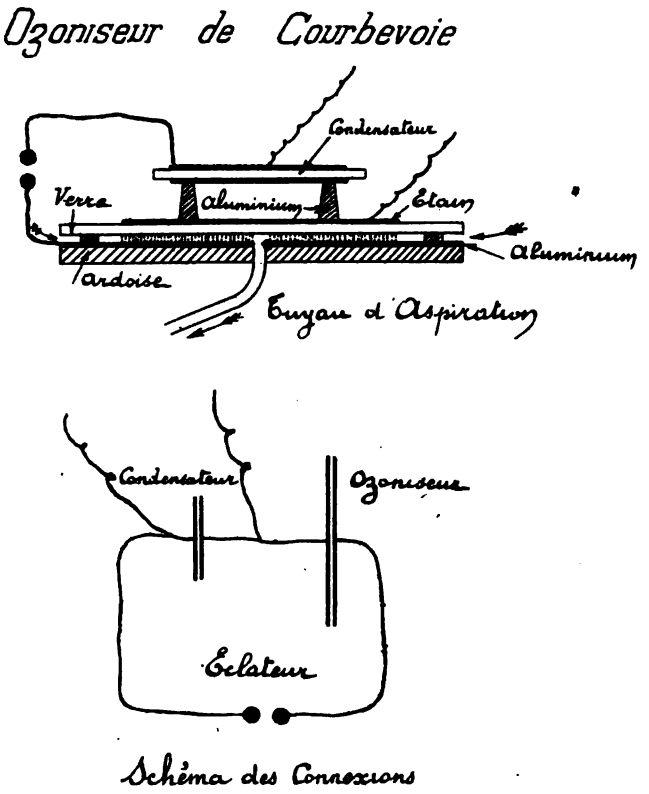


Fig. 10.

à l'armature d'étain de l'ozoniseur. Les points alimentés par les transformateurs sont l'armature supérieure du condensateur et la feuille d'étain de l'ozoniseur. Un *éclateur* à boules met en relation l'armature supérieure du condensateur et la lame d'aluminium. L'effluve est en série avec l'étincelle, dont l'éclat et le bruit dénotent une décharge oscillante [1].

On règle l'aspiration de façon à ne pas dépasser une teneur en ozone de 2 à 3 grammes par mètre cube. On produit ainsi 1 kilo-

[1] Tous les constructeurs d'appareils à ozone s'accordent à dire que la décharge oscillante favorise la production de l'ozone.

gramme d'ozone à l'heure avec une dépense de 35 à 40 kilovolt-ampères (facteur de puissance, 0,6 à 0,7).

L'air ozoné est employé à l'usine de Courbevoie pour la fabrication de certaines aldéhydes : le *pipéronal*, connu en parfumerie sous le nom d'héliotropine, obtenu par l'oxydation de l'isosafrol ; l'*aldéhyde anisique* (nom commercial *aubépine*), obtenue par l'oxydation de l'anéthol ou plus simplement de l'essence d'anis, qui en est presque entièrement formée. Mais la production importante est celle de la *vaniline*, obtenue par oxydation de l'isoeugénol. Voici le schéma de cette fabrication.

Fabrication de la vaniline. — Le point de départ est l'essence de clous de girofle. Cette essence est préparée à l'usine même.

On chauffe cette essence avec de la potasse en solution aqueuse. On chauffe à la vapeur pour séparer par distillation certaines impuretés de la masse cristalline d'eugénate de potasse.

L'eugénate de potasse est chauffé à 300° avec un excès de potasse. L'isomérisation se produit.

On traite par l'acide sulfurique pour séparer l'isoeugénol.

L'isoeugénol est oxydé dans des barboteurs à aspiration où circule l'air ozoné. On ne cherche pas à transformer tout l'isoeugénol, car l'oxydation serait trop complète, et il y aurait formation d'une quantité considérable de matières résineuses qui se produisent d'ailleurs toujours. Il ne faut pas non plus transformer trop peu d'isoeugénol, sous peine d'accroître considérablement la main-d'œuvre. Des considérations économiques très simples permettront de déterminer le degré d'oxydation à atteindre.

La vaniline produite est isolée par la combinaison bisulfitique ordinaire. Le liquide isolé du composé bisulfitique est distillé dans le vide pour récupérer l'isoeugénol non altéré qui rentre dans la fabrication. Le résidu de cette distillation est constitué par des résines que des fabricants de vernis utilisent.

La combinaison bisulfitique est décomposée par l'acide sulfurique. La vaniline est dissoute dans la benzine. La dissolution, soumise à la distillation dans le vide, donne comme résidu la vaniline brute, qu'on purifie par plusieurs cristallisations dans l'eau [1].

---

[1] Le rendement est d'environ 1 kilogramme de vaniline pour 50 kilogrammes de clous de girofle.

Avec sa batterie de 200 ozoniseurs, l'usine de Courbevoie peut fabriquer par our 80 kilogrammes de vaniline d'un prix actuel de 50 francs le kilogramme.

LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DANS LA CONSTRUCTION DES DYNAMOS A COURANT CONTI (1)

Par M. R.-V. Picou,
Ingénieur des Arts et Manufactures.

La construction des machines dynamo-électriques repose sur des lois physiques parfaitement établies ; mais il y a loin de l'expression physique de quelques lois à leur mise en œuvre concrète sous forme d'une machine destinée à remplir une fonction industrielle déterminée.

Cette mise en œuvre est tout l'art de l'ingénieur. Comment celui-ci transforme-t-il l'appareil des équations physiques en formules simples d'application ; comment, en un mot, transporte-t-il la physique dans le bureau d'études d'une usine? C'est là ce que vous avez désiré entendre, et ce que vous avez bien voulu me demander d'exposer, en me limitant au sujet spécial des dynamos à courant continu ; c'est ce que je vais essayer de vous décrire aussi sommairement et clairement qu'il me sera possible.

Les lois générales qui sont la base physique de l'établissement de ces machines sont au nombre de trois, qui sont :

La loi de l'induction électromagnétique ;

La loi d'Ohm ;

La loi de l'induction magnétique.

Leurs expressions mathématiques les plus voisines de celles dont la pratique fait usage sont :

$$e = n\frac{d\Phi}{dt};$$

$$i = \frac{e}{r};$$

$$\Phi = 4\pi n i \Sigma \frac{\mu S}{l}.$$

Tel est le point de départ physique ; voyons maintenant le côté industriel :

Toute machine est conçue en vue d'une application déterminée, et c'est cette application même qui définit les conditions dans lesquelles elle devra fonctionner. Ces conditions sont aussi variées que les besoins de l'industrie. Tantôt il s'agira d'obtenir un courant variable

(1) Conférence faite le 8 mai 1905.

dans de larges limites avec une tension constante aux appareils d'utilisation : dynamos pour éclairage par lampes en dérivation, par exemple. Tantôt ce sera l'inverse qui sera nécessaire, courant constant et tension variable, comme dans un survolteur de batterie d'accumulateurs ; enfin on rencontrera encore toutes les conditions intermédiaires imaginables.

Quelles que soient ces conditions, elles peuvent toujours se résumer pratiquement ainsi qu'il suit :

1° On connaîtra toujours la tension maxima et le courant maximum ; ils définissent la puissance P de la machine ;

2° On connaîtra la loi de variation des deux facteurs E et I de la puissance, variation qui définit ses propriétés particulières.

A ces deux ordres de données correspondent deux phases bien distinctes de l'étude, savoir :

1° Le calcul proprement dit des dimensions géométriques et électriques ;

2° La prédétermination des conditions de fonctionnement, c'est-à-dire de la variation relative de E et de I.

Cette seconde partie peut naturellement conduire à recommencer la première pour serrer de plus près, au moyen d'approximations successives, le résultat visé.

Le calcul pratique exige que la notation des formules soit très simple. Les différentielles et intégrales n'ont pas cours dans les bureaux d'étude, et l'ingénieur doit d'abord simplifier dans la mesure du possible les formules de la physique, sans sacrifier leur rigueur, pour faire du calcul une véritable opération industrielle.

La loi d'Ohm possède toute la simplicité de forme désirable.

La loi de l'induction électromagnétique est facilement réductible à de nombreuses formes simples. L'une des plus commodes est :

$$e = 4nf\Phi,$$

où n est le nombre de spires entre balais successifs ;
f, la fréquence du renversement du flux dans l'induit ;
Φ, le flux émanant d'un pôle.

Enfin, vient la loi de l'induction magnétique, qui n'est entrée qu'assez tardivement, avec toute sa rigueur, dans le calcul des dynamos, bien qu'elle fût contenue dans les traités d'électricité. Elle n'y était pas énoncée sous une forme bien explicite, et la facilité de son application restait masquée sous les symboles physiques. Ce n'est

que par une assimilation hardie, par analogie entre la création d'un flux et celle d'un courant, que les ingénieurs ont pu l'introduire dans leurs calculs, mais seulement après dix années de construction industrielle des dynamos.

La notion capitale du circuit magnétique, d'où découlent celles de réluctance et de force magnéto-motrice, a permis de la ramener à la même simplicité de forme que la loi d'Ohm, et d'écrire :

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}.$$

Sans doute la simplicité n'est pas aussi grande que la forme seule pourrait le faire croire ; mais l'essentiel pour nous a été de préciser chacune des notions physiques qui y figurent, en la rattachant par analogie à une notion antérieurement acquise, en lui donnant une dénomination qui rappelle cette analogie.

Une fois armé de ces formules simples, on peut aborder le calcul proprement dit.

Le premier point est de déterminer les dimensions générales de la machine, ce que nous appelons ses dimensions de carcasse. Celles-ci ne dépendent évidemment que de leur puissance maxima, indépendamment, en gros, des valeurs particulières des facteurs E, I, de cette puissance.

Par une combinaison des formules fondamentales, nous avons pu facilement éliminer ces valeurs et exprimer cette puissance en fonction seulement : des dimensions principales de l'induit (diamètre d, longueur l) ; — de la vitesse à la circonférence v ; — de la densité électrique linéaire δ sur la circonférence de l'induit (ampère-conducteurs par centimètre de circonférence) ; — enfin, de la densité magnétique du champ d'entrefer $\mathcal{H}$.

L'expression générale est :

$$P = A \,.\, dlv \,.\, \delta \,.\, \mathcal{H},$$

formule d'une grande simplicité, où A est un facteur purement numérique.

Nous nous trouvons ainsi en présence de cinq indéterminées, parmi lesquelles v au moins se trouve précisée par des considérations d'ordre purement mécanique. Pour déterminer les autres, nous procédons, *en apparence*, empiriquement, en profitant de remarques

que l'on peut, pour le moment, considérer comme de simples résultats de statistique obtenus par comparaison d'un grand nombre de bonnes machines. On observe, en effet, que, si différentes que soient les dimensions des dynamos à courant continu, si variées leurs applications, certaines relations très sensiblement constantes subsistent entre ces indéterminées. Ainsi, on voit que δ et $\mathcal{H}$ varient très peu, dans la proportion de 3 à 4 seulement, quand la puissance varie de 1 à 50 et plus ; il est donc tout indiqué d'introduire, *a priori*, dans le calcul, des valeurs moyennes de ces quantités. Entre d et l, diamètre et longueur de l'induit, on trouve aussi une relation simple. Pour toutes les machines à deux pôles, on a très sensiblement $d = l$; pour les multipolaires, à $2p$ pôles, on observe $d = lp$ comme relation très générale aussi. Nous la prenons encore comme empirique ; et le problème des dimensions générales se trouve ainsi résolu, au moins pour les dynamos à deux pôles.

L'ordre de polarité n'est lui-même pas arbitraire. On reconnaît vite au calcul que, sur les fortes machines à deux pôles, il devient impossible de satisfaire aux valeurs de δ en usage courant. Pour ne pas s'en éloigner, on est conduit à subdiviser virtuellement la dynamo en un certain nombre d'unités faibles, juxtaposées, et à construire la dynamo multipolaire.

Les dimensions géométriques principales du noyau induit sont ainsi facilement déterminées. Je rappelle seulement pour mémoire que nous devons de toute nécessité feuilleter ce noyau magnétique par des plans parallèles à la direction de propagation du flux de force ; faute de quoi ce flux s'annulerait pour ainsi dire de lui-même par la réaction des courants de Foucault auxquels il donnerait naissance.

Reste à déterminer le bobinage de cet induit. La pratique générale est aujourd'hui de loger les fils induits dans des rainures creusées à même la masse de fer ; mais, comme ce sont assurément des avantages d'ordre purement mécanique qui ont conduit à cette pratique, je n'y insiste pas ici. Le calcul de bobinage résulte de l'application de la formule fondamentale de l'induction électromagnétique. Le nombre n de spires entre balais y est la seule inconnue, puisque f dérive de v et que Φ est déterminé par le produit de la section S du fer induit par l'induction $\mathcal{B}$ à laquelle il est soumis. $\mathcal{B}$ est reliée à $\mathcal{H}$ par une équation de continuité du flux ; elle est donc connue aussi. Enfin la section droite du conducteur de chaque spire se

déduit elle-même de la densité superficielle dans le fil (ampères par millimètre carré), laquelle est liée à la densité périphérique linéaire δ par une relation de grande simplicité. L'induit est donc ainsi complètement établi. Restent à déterminer les dimensions de l'entrefer et de la carcasse inductrice qui forment le complément du circuit magnétique.

L'entrefer est encore une de ces quantités qui varient très peu avec la dimension des dynamos ; on peut donc en préciser tout d'abord la valeur, sans crainte d'erreur sérieuse, d'après l'expérience acquise.

L'inducteur devra posséder une section de fer déterminée par le flux qui doit le parcourir et l'induction à laquelle on consent à soumettre la matière constitutive, fonte ou fer.

La forme générale, le dessin, de cette carcasse d'inducteur, est le plus souvent arbitraire ; la plus simple est la meilleure. Parfois elle est imposée par la destination même de la dynamo (moteur de traction à monter sur un essieu de véhicule, par exemple) ; il faut alors tirer le meilleur parti possible de la place disponible.

Le bobinage inducteur se détermine par l'application de la loi de l'induction magnétique, mais dont les éléments ont été mis au préalable sous une forme d'application facile. L'assimilation par analogie de la réluctance à la résistance rapproche la conductivité électrique de la perméabilité magnétique ; mais, alors que la première peut être considérée comme pratiquement constante, la seconde, au contraire, est loin d'avoir le même caractère et se présente comme une véritable fonction de l'induction.

Ainsi obligés de recourir constamment à des tables de perméabilité, les ingénieurs ont dressé des tableaux qui donnent directement la force magnétisante nécessaire (en ampère-tours par centimètre) pour déterminer une induction $\mathfrak{B}$ donnée dans l'air, dans la fonte, dans les différents fers. On en déduit très simplement les ampère-tours nécessaires pour chaque partie intégrante du circuit magnétique d'après sa longueur propre ; et la sommation de ces ampère-tours définit l'excitation nécessaire. Le partage du produit ampère-tours entre ses constituants, courant magnétisant et nombre de spires, se fait ultérieurement, et d'après les propriétés qu'on veut assurer à la dynamo afin de l'approprier exactement au service industriel auquel elle est destinée.

Le calcul proprement dit de la machine est ainsi achevé. On

reconnaît que, bien qu'il repose sur les principes généraux de la physique, l'empirisme semble encore y prendre une très grande part ; nous avons dû, en effet, choisir arbitrairement δ, $\mathcal{H}$, $\mathfrak{B}$ dans l'inducteur, admettre une relation de simple statistique, $d = lp$. Mais j'ai fait remarquer que ces quantités varient très peu, presque pas, avec la dimension des machines ; ce ne peut être là l'effet d'un hasard.

En effet, la constance de ces quantités n'est que la manifestation pratique des conditions imposées par le phénomène fondamental de la *commutation*. Ces conditions de bonne commutation dominent absolument toute l'étude des dynamos à courant continu ; seulement, comme elles ne sont susceptibles d'une expression mathématique ni assez exacte ni assez simple pour pouvoir être introduites directement dans le calcul, on ne les y fait entrer qu'implicitement. La constance de certaines quantités, que nous prenons empiriquement, n'est que la manifestation de ces conditions ; mais nous pouvons ainsi en fixer la valeur dès l'origine du calcul, avec la certitude de choisir des valeurs propres à éviter trop de tâtonnements dans la détermination des autres. D'autres considérations, secondaires au point de vue physique, mais pratiquement importantes, telles que l'économie des matériaux, contribuent aussi à certaines précisions de même nature.

La première partie de la tâche est achevée avec ce calcul de dimensions. Arrivé à ce point, la question que se pose l'ingénieur est la suivante : la machine ainsi calculée est-elle bien appropriée à sa destination ?

Pour résoudre cette seconde partie du problème, nous devrons recourir à des méthodes toutes différentes. Jusqu'ici, pour déterminer des dimensions, nous avons dû établir et résoudre les équations dont elles étaient les inconnues. Mais, pour l'examen des propriétés individuelles de la dynamo projetée, le calcul devient soit insuffisant, soit du moins insuffisamment figuratif pour les besoins de la pratique. Ce que nous devons étudier maintenant, ce sont de véritables fonctions, et nous sommes ainsi conduits à prendre comme instrument de travail leurs représentations graphiques.

Les courbes dites *caractéristiques* ont été d'abord introduites dans l'électrotechnique comme une figuration des conditions variées

du fonctionnement. Leur notion a été, depuis vingt ans, singulièrement étendue et élargie; elles ont été rattachées à la théorie physique elle-même, et ont pu être employées non seulement comme mode de représentation, mais encore comme moyen d'investigation permettant de déterminer à l'avance, d'après le projet, toutes les conditions du fonctionnement dans les conditions les plus variées.

L'étude du fonctionnement met en jeu plusieurs variables : force électromotrice, courant d'excitation, courant extérieur. Il faut naturellement les introduire successivement dans l'étude.

Prenons comme point de départ la représentation de la force électromotrice en fonction de l'excitation, en excitation indépendante, par exemple. On reconnaît immédiatement que cette courbe $E = f(i)$ ne diffère que par un changement d'échelle de $\Phi = f(\mathcal{F})$. Cette première courbe permet de déterminer le bobinage d'excitation par des considérations très simples.

Celui-ci connu, on peut en déduire les conditions de marche en auto-excitation, à circuit ouvert, d'une génératrice excitée en dérivation, d'après ce bobinage.

Il est ensuite possible de passer à la détermination de $E = f(I)$, dont la courbe est la véritable représentation de la loi du fonctionnement industriel. C'est elle qu'il faudra comparer avec la loi idéale imposée par l'application en vue. D'après le résultat de la comparaison, on jugera aisément des retouches que doit subir le projet et de l'approximation que l'on pourra obtenir.

Le constructeur aura ainsi une connaissance de la machine aussi complète qu'il est possible de la déterminer à l'avance.

Il va sans dire que, dans cette suite de déductions, bien des points restent soumis à l'appréciation, et c'est dans l'exacte évaluation de ces indéterminées que réside l'habileté de l'ingénieur.

Assez récemment, on a notablement perfectionné encore le point de départ de ces tracés. On a reconnu qu'il y avait un grand intérêt à décomposer la caractéristique prise ci-dessus comme point de départ, et qui dépend de toutes les pièces du circuit magnétique, en éléments partiels relatifs à certaines d'entre elles seulement. On a pu ainsi étendre l'emploi de ces caractéristiques partielles aux circuits de dispersion eux-mêmes, qui jouent un rôle important dans les conditions finales de fonctionnement. Ainsi l'étude complète des machines, dans sa plus grande généralité, a pu être rattachée entiè-

rement aux trois courbes partielles suivantes, qu'on doit véritablement considérer comme les fondements de l'étude :

Caractéristique de l'inducteur seul;

Caractéristique de l'entrefer et de l'induit;

Caractéristique du circuit de dispersion d'inducteur.

Toutes ces courbes sont, évidemment, d'origine magnétique; leur combinaison permet une représentation très claire, au moyen de tracés graphiques d'une grande simplicité, des conditions du fonctionnement, en partant seulement du dessin de la machine et de la connaissance des propriétés électriques et magnétiques des matériaux.

Ces tracés successifs ne sont d'ailleurs que la traduction des équations déduites de l'application des lois de Kirchhoff aux circuits magnétiques.

On voit par là combien a été féconde pour nous cette notion du circuit magnétique, et combien l'application de la loi d'Ohm et des lois dérivées à cette nature de circuits a jeté de lumière dans l'étude du fonctionnement des dynamos.

Tel est, Messieurs, le parti que les ingénieurs ont tiré des notions physiques fondamentales en ce qui concerne les dynamos à courant continu. Leur construction repose aujourd'hui sur des principes solides, et le fait qu'un état définitif est atteint se trouve attesté par l'identité des machines de tous les constructeurs. Il n'y a plus de systèmes particuliers, et les machines ne diffèrent que par des détails à peu près insignifiants ; les rendements, excellents en valeur absolue, et l'utilisation des matériaux y ont été poussés à l'extrême.

Est-ce à dire que la perfection soit atteinte et que l'avenir ne nous réserve plus aucun progrès? Certes non. La perfection des machines dynamo-électriques n'est que relative aux conditions présentes de l'industrie. Que celles-ci progressent de leur côté, et la dynamo devra suivre. Or il semble bien que nous sommes précisément à l'aurore d'un tel progrès.

La machine dynamo-électrique n'existe que parce que l'énergie mécanique est la forme la plus économique de toutes les formes supérieures de l'énergie ; elle est donc toujours associée à un moteur, le plus souvent à un moteur spécial. La véritable entité est donc le groupe électrogène, ensemble dont l'étude réclame une collaboration intime du mécanicien et de l'électricien. Si les conditions du moteur

viennent à être modifiées, il est vraisemblable qu'il devra en être de même de celles de la dynamo conjointe.

Or les progrès de la métallurgie, depuis quelques années, ont mis à la disposition des mécaniciens des matériaux dont la ténacité, exceptionnellement élevée, a permis de dépasser d'une quantité énorme les vitesses linéaires de 20 à 25 m : sec, qui formaient la limite pratique de la mécanique vingt-cinq années en arrière.

Les mécaniciens ont ainsi pu réaliser, dans d'admirables conditions, la vieille idée de la turbine à vapeur, et offrir aux électriciens des moteurs extrêmement puissants sous de petits volumes, mais animés de vitesses angulaires très élevées, comportant des valeurs de la vitesse linéaire à la circonférence de 100 à 150 m : sec, par exemple. L'attelage de dynamos à courant continu sur de tels moteurs présente les plus grandes difficultés ; pour n'en signaler qu'une d'ordre purement électrique, la commutation devient excessivement pénible parce que trop rapide, malgré l'emploi de tous les artifices favorables connus. Les quelques réalisations de groupes électrogènes ainsi constitués qui ont été ainsi faites pendant ces dernières années ont surtout servi à démontrer que la dynamo continue à collecteur est mal appropriée aux qualités de ces moteurs nouveaux. Il faut donc chercher autre chose.

Les électriciens ont alors, eux aussi, repris une vieille idée, celle des machines dites unipolaires. Ce type de dynamo, dépourvu de collecteur, mal approprié aux faibles vitesses de l'industrie, n'avait reçu que de très rares et très spéciales applications ; aujourd'hui, il semble reprendre la supériorité pour l'emploi aux très grandes vitesses, précisément là où la dynamo à collecteur se trouve inférieure à elle-même. C'est dans cette voie que sont orientées en ce moment des recherches nouvelles ; elles sont encore trop récentes pour avoir pu donner autre chose que des promesses ; mais elles pourraient très bien ouvrir une voie nouvelle au développement des dynamos à courant continu.

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES DANS L'INDUSTRIE ;

Par M. A. Hillairet [1].

Les moteurs électriques se divisent en deux catégories, suivant qu'ils sont alimentés par du courant continu ou par du courant alternatif.

MOTEURS A COURANT CONTINU.

Au point de vue de leur emploi, ces moteurs sont caractérisés avant tout par leur mode d'excitation, qui peut être :

1° En série ;
2° En dérivation ;
3° Mixte ou compound.

1° Dans l'excitation en série, qui est la plus anciennement connue, le circuit des inducteurs est parcouru par le courant total de l'induit. Il en résulte une apparence complexe pour l'expression qui représente le couple moteur en fonction de l'intensité. En réalité, cette expression se simplifie et prend une forme linéaire dans les limites pratiques.

Si on alimente sous une tension constante un moteur excité en série, on voit que la vitesse est fonction de l'intensité, ou, si on veut, du couple moteur ; la force contre-électromotrice, proportionnelle au flux magnétique balayé par les spires dans l'unité de temps, varie avec l'induction et avec la vitesse. Si la résistance intérieure de l'induit et des inducteurs est très faible relativement, comme dans les dynamos actuelles, le produit du flux qui traverse l'induit par la fréquence varie peu : il en résulte que les deux dernières quantités varient sensiblement en sens inverse l'une de l'autre, quand la tension est maintenue constante aux bornes.

En conséquence, les moteurs excités en série auront une excitation croissante avec le couple résistant et leur vitesse, sous tension constante, variera avec le couple résistant, mais en sens inverse.

Les cas de la pratique auxquels conviennent ces moteurs nécessitent un réglage à chaque instant, par l'intermédiaire d'un appareil

---

[1] Conférence faite le 16 mai 1905.

spécial (traction, appareils de levage), à moins que les emballements ne soient pas à craindre (couple résistant fixe ou croissant avec la vitesse, pompes centrifuges, ventilateurs, propulseurs pour bateaux).

Si un couple énergique doit être exigé au démarrage (traction, manœuvres intermittentes à effort variable), ce mode d'excitation est particulièrement favorable.

Mais il faut le bannir dans le cas fréquent où on exige une vitesse constante avec un couple résistant variable (conduite des transmissions d'ateliers et usines).

2° Les moteurs dont les inducteurs sont excités en dérivation sont destinés à être alimentés sous une tension qu'on s'efforce de maintenir aussi fixe que possible; il en résulte que l'intensité du courant d'excitation est maintenue à la même fixité et de mêmela force magnétomotrice.

Si l'induit du moteur tourne complètement à vide, entraîné par un courant d'intensité relativement négligeable, comme il arrive dans les machines actuelles, la force contre-électromotrice est sensiblement égale à la tension aux balais, c'est-à-dire aux bornes mêmes de la dynamo.

Si on charge le moteur, la force contre-électromotrice s'abaisse au-dessous de la tension aux balais d'une quantité égale à la perte de charge dans l'induit.

Or celle-ci ne peut dépasser, en régime continu, une valeur représentée par quelques centièmes de la tension d'alimentation : il en résulte directement que la vitesse du moteur en charge ne peut différer normalement de la vitesse à vide que de quelques centièmes.

Si on calcule, pour un moteur donné, cette différence des vitesses à vide et en charge et si on vérifie expérimentalement le résultat de ce calcul préalable, on trouve une concordance très satisfaisante, et même quelquefois un écart des vitesses un peu moindre que le calcul ne l'indique; ce dernier cas correspond aux dynamos ayant une réaction d'induit appréciable qui tend à affaiblir le flux inducteur à mesure que l'intensité du courant augmente. Cette diminution du flux donne lieu à un léger relèvement de la vitesse au-dessus de la valeur qu'atteindrait celle-ci avec un induit sans réaction [1].

---

[1] La constance absolue de la vitesse, quelle que soit la charge, peut être obtenue par l'emploi d'un circuit auxiliaire disposé sur les inducteurs, parcouru par le courant principal et donnant lieu à une force magnétomotrice inverse de la force

En résumé, dans la pratique, le moteur à inducteurs excités en dérivation, fonctionnant sous tension constante, est considéré comme moteur à vitesse constante.

Dans tous les cas où cette dernière condition est imposée avec le courant continu, l'emploi de ce type de moteur est déterminé (transmissions générales d'usines et ateliers).

On arrive ainsi facilement à un coefficient de régularité de 2 à 5 0/0, sans l'emploi d'aucun organe de réglage.

3° L'excitation mixte ou compound est une combinaison des deux modes d'excitation précédents : les inducteurs d'un même moteur reçoivent dans ce cas deux circuits, dont l'un est en dérivation aux bornes, et l'autre en série avec l'induit.

L'allure d'un tel moteur, en fonction de la charge et sous tension constante, participe à la fois de l'allure du moteur excité en série et de l'allure du moteur excité en dérivations, dans telle proportion qu'on veut, suivant la force magnétomotrice qu'on attribue à chacun des deux circuits inducteurs.

Un moteur à excitation compound ne s'emballera pas à l'excès à vide, mais sa vitesse baissera sensiblement quand la charge augmentera ; on pourra calculer les enroulements inducteurs suivant un coefficient d'emballement donné (1).

Le démarrage de ces moteurs est facilité par l'enroulement en série des inducteurs, dont la force magnétomotrice est de même sens que celle de l'enroulement en dérivation ; on peut mettre ces moteurs en marche sans avoir à exciter au préalable l'enroulement en dérivation.

Ces moteurs sont donc employés dans les cas où la vitesse peut varier entre certaines limites avec la charge et quand on veut mettre en marche, à distance, des machines dont la vitesse ne doit pas devenir excessive à vide.

Procédés de mise en marche. — L'emploi de rhéostats avec com-

---

magnétomotrice due au circuit inducteur en dérivations ; cette disposition, connue depuis longtemps, est peu employée : elle n'est pas pratiquement nécessaire et peut donner lieu à un renversement du sens de la marche au démarrage, si celui-ci est effectué trop brusquement.

(1) Il est quelquefois intéressant d'obtenir des vitesses croissant naturellement quand le couple résistant diminue (allures variées des machines à travailler le bois, appareils de levage à charge variable, etc.).

mutateurs est général pour la mise en marche des moteurs. L'étendue des résistances et leur fractionnement varient suivant les applications.

Les rhéostats à liquides légèrement salins (carbonate de soude, par exemple) pour les basses tensions, et à eau pure pour les hautes tensions, peuvent présenter telle étendue qu'on veut, avec un fractionnement infinitésimal, sauf au contact des lames où il se produit une variation brusque de résistance qu'on s'efforce de rendre aussi faible que possible (éviter la formation d'un arc au sein du liquide).

Ces rhéostats sont d'un usage courant : leur prix est peu important et leur entretien élémentaire.

La valeur élevée de la chaleur spécifique de l'eau permet des mises en marche assez lentes.

On se sert de ces appareils pour les plus faibles comme pour les plus puissants moteurs. On en a disposé sur des locomotives à basse tension et sur des locomotives à haute tension, avec du courant continu comme avec du courant alternatif.

Les rhéostats uniquement métalliques sont peut-être plus répandus ; une construction d'apparence plus mécanique que celle des appareils précédents leur assure une certaine faveur des praticiens, bien que celle-ci ne soit pas toujours justifiée.

La faible chaleur spécifique du métal, le développement des surfaces qui en résulte pour assurer la dissipation de l'effet Joule, le fractionnement nécessairement limité des éléments de résistance, sont autant de difficultés qui compliquent l'établissement des rhéostats de simple démarrage (dans les résistances desquels le courant ne passe que pendant un temps faible et déterminé à l'avance) ou de réglage, plus développés que les précédents (le courant pouvant être établi pendant un temps illimité dans tout ou partie des résistances).

Le fractionnement a pu être réduit par l'usage du soufflage magnétique entre les touches du commutateur : les arcs de rupture sont chassés normalement au flux magnétique d'un électro-aimant parcouru par le courant lui-même ou par une dérivation (dispositif issu de l'ancien chalumeau électrique des laboratoires).

Les métaux les plus employés dans la construction des rhéostats sont le fer, le cuivre et des alliages variés de nickel, dont le maillechort en tête. Le fer et le cuivre ont des coefficients de température élevés; leur résistance est donc très variable avec la température.

Le fer s'oxyde, dans certains milieux, avec une grande rapidité (émanations de vapeurs acides, voisinage de la mer).

Le maillechort ne s'oxyde pas : son coefficient de température est faible et sa résistivité élevée. Le ferro-nickel est à rejeter en général, malgré sa grande résistivité, car il s'oxyde et devient fragile.

Sauf de très rares exceptions, les appareils de démarrage des tramways et locomotives électriques comportent des rhéostats métalliques avec soufflage magnétique aux touches de contact. Certains appareils supportent jusqu'à 3 ou 4.000 ampères au démarrage sous 6 à 700 volts.

Toutefois, avec des intensités aussi importantes, on a songé à faire produire une tension graduellement croissante pour les démarrages directement par la génératrice, dont l'excitation est portée graduellement de 0 à son taux maximum. Cette solution ne peut convenir que quand une réceptrice correspond à une seule génératrice. Dans le cas où une receptrice est alimentée par un réseau de distribution, si on veut obtenir le même résultat, on intercale en série sur la dérivation correspondante une dynamo à vitesse maintenue constante et dont la tension peut varier graduellement d'un maximum positif à un maximum négatif (rhéostat d'excitation et inverseur du courant d'excitation) ; au maximum négatif correspond une tension nulle aux bornes de la réceptrice, et au maximum positif, la tension maxima d'alimentation : une telle dynamo est dite survolteur, sous-volteur ou dévolteur.

On a appliqué ce procédé à des machines d'extraction : la puissance maxima que peuvent exiger celles-ci atteint souvent des valeurs élevées (plus de 1.000 kilowatts par exemple) et leur régime est périodiquement variable.

Freinage électrique. — Quand on coupe le courant qui alimente l'induit d'une réceptrice lancée à une certaine vitesse, celle-ci décroît immédiatement. L'amortissement est moins rapide si on a supprimé l'excitation que si on la maintient ; dans ce dernier cas, les courants développés dans le fer de l'induit ainsi que l'hystérésis donnent lieu à un couple retardateur qui vient s'ajouter au couple des résistances passives d'ordre mécanique.

Si, après avoir séparé l'induit du réseau, on réunit ses balais par une résistance, l'excitation étant maintenue (excitation en dérivation par exemple), la dynamo fonctionne en génératrice sur cette résis-

tance et le couple retardateur est accru d'une quantité facile à calculer à chaque instant [1]. On réalise ainsi le freinage électrique.

Si on veut freiner un moteur excité en dérivation, il n'y a d'autre précaution à prendre que de maintenir l'excitation tout le temps que les balais sont reliés par la résistance; s'il s'agit d'un moteur excité en série, il faudra, au moment du freinage, intervertir les connexions des inducteurs avec les balais, sinon la dynamo ne s'amorcerait pas, et enfin, pour un moteur à enroulement mixte ou compound, on supprimera, pour simplifier, le gros fil du circuit des balais et on ne maintiendra l'excitation que dans le fil fin, c'est-à-dire dans l'excitation en dérivation.

Le freinage électrique est d'autant plus actif que la résistance intercalée entre balais est plus faible, et la vitesse de rotation plus élevée. Quand celle-ci tend à s'annuler, on réduit jusqu'à l'annuler la résistance entre les balais. Ceux-ci sont généralement en court-circuit à la fin du freinage.

On fait usage du freinage électrique dans la traction, dans les appareils de levage et dans le cas où on veut obtenir des arrêts précis (ascenseurs, pointage des canons).

---

(1) La loi de l'amortissement du freinage électrique s'établit comme la loi d'amortissement du cadre du galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

Dans le cas simple idéal, où il n'y aurait d'autre couple retardateur que celui qui provient du courant passant dans la résistance entre balais, on obtient la loi :

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1}{e^{\frac{1}{MR^2} \cdot \frac{1}{\Sigma\rho} \cdot \left(\frac{n\Phi}{2\pi \cdot 10^8}\right) \cdot t}}.$$

ω_0, vitesse angulaire initiale à partir de laquelle a commencé le freinage ;
ω, vitesse angulaire à l'époque t à partir du commencement du freinage :
e, base des log. nép. ;
MR^2, moment d'inertie du système tournant ;
$\Sigma\rho$, résistance du circuit de l'induit ;
n, nombre de spires ou cadres en série de l'induit ;
Φ, flux traversant l'un des cadres.

Dans le cas plus voisin de la pratique où, au couple retardateur précédent, essentiellement variable, il y a lieu d'ajouter un couple retardateur constant P, on obtient la loi :

$$\frac{\frac{\left(\frac{n\Phi}{2\pi \cdot 10^8}\right)^2 \omega}{\Sigma\rho} + P}{\frac{\left(\frac{n\Phi}{2\pi \cdot 10^8}\right)^2 \cdot \omega_0}{\Sigma\rho} + P} = \frac{1}{e^{\frac{1}{MR^2} \cdot \frac{1}{\Sigma\rho} \cdot \left(\frac{n\Phi}{2\pi \cdot 10^8}\right) \cdot t}},$$

dont la précédente est naturellement un cas particulier, celui où $P = 0$.

La facilité avec laquelle s'amorce ce freinage en rend quelquefois l'effet brutal : aussi, actuellement, dans la traction, on ne le conserve que comme freinage d'urgence et on ne l'applique qu'après les autres procédés ordinaires.

D'autre part, en graduant convenablement la résistance de freinage, et en ne la faisant varier que doucement, on obtient des arrêts qui conviennent mieux à certaines manœuvres que les arrêts produits par les autres procédés, la quantité principale du couple retardateur ne dépendant pas d'un coefficient de frottement plus ou moins variable, mais uniquement de quantités fixes (champ magnétique, résistances ohmiques).

Procédés de distribution. — La distribution en dérivation (en quantité ou en parallèle) sous tension fixe — ou du moins pratiquement fixe — est de beaucoup la plus répandue, soit sous sa forme la plus simple (deux conducteurs correspondant chacun à l'un des pôles), soit sous des formes plus compliquées (distribution à conducteurs multiples, à plusieurs ponts égaux ou inégaux).

Ce dernier procédé consiste dans l'emploi d'une série de génératrices de tensions égales ou inégales, associées en série (ou tension) et aux bornes desquelles aboutissent des conducteurs qui cheminent parallèlement sur tout le parcours du réseau. Chaque point du réseau peut donc être alimenté sous les n tensions que distribuent les $n + 1$ conducteurs.

La gamme des tensions les plus usuelles donne au total un multiple de 110 ou 120 volts; le nombre des ponts dépasse rarement 4 correspondant à 5 conducteurs.

On trouve, par exemple, des distributions à $120 \times 2 = 240$ volts et d'autres à $120 \times 4 = 480$ volts.

La distribution à ponts multiples devrait être plus répandue qu'elle ne l'est actuellement pour l'alimentation des réceptrices. Elle permet, en effet, d'obtenir pour celles-ci des vitesses variées sans l'introduction d'aucun rhéostat en série avec les induits. Ce procédé est donc, au point de vue électrique, l'équivalent du procédé mécanique des cônes étagés que possèdent la plupart des machines-outils

Ces cônes peuvent et doivent disparaître dans les établissements alimentés par un réseau à plusieurs tensions.

Les tensions étagées d'un même réseau peuvent être inégales : on

peut réaliser par exemple une distribution à deux ponts comportant

Un pont à.....	120 volts
Et un pont à...,	240 —

On aura ainsi à sa disposition :

Premier pont.....	120 volts
Deuxième pont.....	240 —
Ensemble.....	360 volts

soit trois tensions pour deux ponts et trois conducteurs seulement.

Nous avons réalisé ce mode de distribution dans plusieurs usines depuis une dizaine d'années.

Avec l'emploi de ces deux ponts inégaux, le passage de 240 à 360 volts sans inversion de polarité complique un peu les appareils de mise en marche ; l'emploi de ponts égaux donne lieu à des appareils plus simples.

Nous ne pouvons passer sous silence les distributions en série, qui ne sont que l'exception si on les compare aux précédentes, parce qu'elles entraînent des sujétions la plupart du temps prohibitives, mais elles ont des propriétés intéressantes qu'il importe de faire entrevoir rapidement.

Dans les distributions en série, c'est-à-dire à intensité constante, la puissance fournie aux bornes de chaque moteur est proportionnelle à la tension entre les mêmes bornes.

Pour mettre en marche un moteur, on l'intercale brutalement dans le circuit. Rien de plus simple. Il n'en est pas de même pour le réglage de l'allure en régime normal : s'il s'agit par exemple de maintenir la vitesse sensiblement constante quand le couple moteur varie, on n'y réussira qu'en agissant sur la force magnétomotrice, c'est-à-dire sur les ampères-tours des inducteurs, soit à la main, soit au moyen de systèmes automatiques.

On peut modifier les ampères-tours des inducteurs soit en shuntant ceux-ci par des résistances, soit en modifiant le nombre des spires actives des solénoïdes, divisés à cet effet en un certain nombre de sections ou galettes. Pour maintenir la vitesse constante, le seul système automatique qui convienne a comme organe principal un régulateur centrifuge (tachymètre). Ce régulateur agit, soit sur les résistances d'un shunt, soit sur les sections ou galettes des solénoïdes.

Ces systèmes automatiques doivent être étudiés et construits avec le plus grand soin, car ils ont à fonctionner au voisinage de l'instabilité (d'où emploi de volants supplémentaires sur les arbres des moteurs).

Le principe des distributions en série a été indiqué par M. Marcel Deprez, en 1880; en fait, des distributions par ce système n'ont été réalisées avec succès que par M. Thury, dix ans plus tard.

Si les moteurs insérés dans une distribution en série actionnent des récepteurs dont le couple résistant augmente avec la vitesse, il n'est pas besoin de régulateurs pour en fixer l'allure : celle-ci est naturellement stable.

C'est par exemple le cas des ventilateurs, pompes centrifuges et hélices. Les moteurs convenablement calculés pour ces applications prennent d'eux-mêmes leur vitesse de régime, sans oscillations, dans un circuit à intensité constante. On voit sans peine comment se produisent l'amortissement et la stabilité.

Les moteurs d'une distribution en série, n'étant alimentés que par une fraction de la tension totale aux bornes des génératrices, ne présentent pas de difficultés de construction au point de vue des isolements : il suffit d'en soigner l'isolement par rapport à la terre (montage sur isolateurs en porcelaine ou en verre).

En pratique, les distributions en série ne tendent à se développer qu'avec les unités génératrices et réceptrices importantes (alimentation de moteurs de sous-stations).

MOTEURS A COURANT ALTERNATIF.

1° Moteurs synchrones à simple phase ;
2° Moteurs synchrones polyphasés ;
3° Moteurs asynchrones polyphasés ;
4° Moteurs asynchrones à simple phase ;
5° Moteurs à collecteur en série ;
6° Moteurs à répulsion ;
7° Moteurs compensés.

1° Moteurs synchrones a simple phase. — 1° Tout alternateur à simple phase peut fonctionner comme moteur si on alimente son induit avec un courant alternatif de tension efficace appropriée.

Ce fonctionnement ne peut être obtenu que :

1° Si la partie mobile de l'alternateur a été au préalable amenée par un autre moteur quelconque à une vitesse angulaire correspondant à la fréquence du courant;

2° Si les inducteurs ont été convenablement excités par du courant continu;

3° Si le couplage de l'induit avec la ligne n'a été opéré que lorsque la force électromotrice de cet induit est rigoureusement en opposition de phase avec la tension qui doit lui être appliquée.

L'époque favorable au couplage est annoncée par un indicateur de coïncidence et d'opposition de phases.

La mise en marche effectuée, si le fonctionnement est stable, la vitesse de la partie mobile de l'alternateur se maintient rigoureusement à la valeur fixe que lui assignent le nombre de ses pôles et la fréquence du courant d'alimentation : c'est le synchronisme absolu non seulement pour chaque tour de la partie mobile, mais pour chaque fraction de tour correspondant à un espace interpolaire.

Dans le parcours de cette dernière fraction de tour, le synchronisme n'est plus absolu : le mouvement de la partie mobile éprouve de légers balancements qui l'écartent du mouvement uniforme. Ces balancements peuvent être négligeables ; ils peuvent se produire, puis s'atténuer; enfin, d'abord négligeables, ils peuvent s'accroître régulièrement sous l'influence d'une action répétée, même très faible, mais dont l'effet s'accorde avec l'ensemble du système.

Dans les deux premiers cas, le fonctionnement est stable ; dans le troisième, il est instable, et la partie mobile de l'alternateur s'arrête dès que le synchronisme est rompu au delà du parcours d'un espace interpolaire.

La valeur du couple d'un tel moteur à simple phase a une allure naturellement pulsatoire.

La possibilité du fonctionnement des alternateurs en moteurs synchrones a été indiquée par J. Hopkinson à la suite des essais qu'il entreprit en 1883 sur les machines magnéto-électriques de Meritens, qui alimentaient les feux du phare du South-Foreland.

Ces essais montrèrent la possibilité de l'accouplement des alternateurs en parallèle, puis du fonctionnement des alternateurs comme il vient d'être dit [1].

L'emploi d'un moteur synchrone nécessite donc :

---

[1] Les machines magnéto-électriques sur lesquelles opéra J. Hopkinson étaient aussi peu appropriées que possible à ces deux modes de fonctionnement.

Une mise en vitesse préalable au moyen d'un moteur auxiliaire quelconque ;

Une excitation préalable des inducteurs avec du courant continu ;

Une vérification de l'opposition des phases ;

Puis, en dehors de la puissance normale à réaliser, une stabilité d'allure absolue.

Il est souvent difficile, et quelquefois pratiquement impossible, de satisfaire à ces conditions, et de subir, en plus, le synchronisme absolu ou l'arrêt brusque en cas de surcharge ou de résonance : aussi ces moteurs sont-ils peu répandus.

Dans le cas où ils sont attelés sur la transmission d'un atelier déjà conduite par un autre moteur, celui-ci est utilisé pour la mise en vitesse, qui ne présente plus de difficultés : il y a des exemples de cette application [1]. Enfin, un moteur synchrone branché en dérivation sur un réseau peut, dans certaines conditions d'excitation et de charge, donner lieu à un courant décalé en avant, et jouer le rôle de condensateur en améliorant le facteur de puissance du réseau.

On emploie quelquefois, dans les postes de transformation des distributions d'énergie, des moteurs synchrones à haute tension pour commander des génératrices à courant continu à basse tension. Un tel groupe est dit « moteur-générateur ». Sa mise en marche est effectuée par le courant continu.

Les commutatrices ou convertisseurs de courant alternatif en courant continu sont des moteurs synchrones, mais qui n'absorbent pour l'entretien de leur mouvement qu'une faible fraction de l'énergie qu'ils reçoivent à leurs bornes.

2° Moteurs synchrones polyphasés. — Tout alternateur à phases multiples ou polyphasé peut fonctionner comme moteur, si on alimente son induit avec une série de courants alternatifs de même fréquence, de tension efficace convenable, et présentant entre eux une équidistance de phase appropriée.

L'induit doit, en conséquence, comporter autant de circuits séparés

---

(1) Celle-ci a donné lieu à un accident qu'il est bon de signaler et qui s'est produit à Engins (Isère).

Un défaut étant survenu à une ligne qui, entre autres moteurs, alimentait un moteur synchrone attelé à la transmission d'une fabrique de papiers, les interrupteurs furent levés à l'usine génératrice. Un ouvrier envoyé pour réparer le défaut fut foudroyé au premier contact. La ligne était encore sous tension du fait du fonctionnement du moteur synchrone en alternateur conduit par le moteur de l'usine, l'excitation n'ayant pas été coupée, faute d'avis.

qu'il y a de courants d'alimentation. Ces circuits sont répartis régulièrement autour de l'axe de rotation : l'induit est, à proprement parler, un groupement, sur un même support magnétique, d'autant d'induits qu'il y a de courants.

Le flux engendré à chaque instant par la combinaison des forces magnétisantes de ces courants est constant et tourne à un nombre de tours par seconde identique au nombre qui exprime la fréquence si chaque alternateur élémentaire est bipolaire ; s'il y a plus de deux pôles, le nombre de tours par seconde effectué par le flux résultant a pour expression le quotient de la fréquence par le nombre de paires de pôles de chaque alternateur élémentaire.

Imaginons un alternateur polyphasé de faibles dimensions, à induit fixe et dont on aurait enlevé le système inducteur : si à la place de celui-ci on dispose une aiguille aimantée suspendue sur un axe, puis si, après avoir lancé au préalable, cette aiguille à une certaine vitesse, on alimente les circuits de l'alternateur, l'aiguille prendra un régime de vitesse uniforme déterminé par la fréquence des courants et le nombre des pôles. On aura ainsi un moteur synchrone polyphasé élémentaire.

Si on remet à sa place le système inducteur, et si, après avoir lancé celui-ci à une vitesse suffisante, on l'excite par du courant continu, puis si on alimente les circuits de l'alternateur, on peut obtenir un mouvement de rotation continu ; le moteur synchrone polyphasé est constitué.

Le couple développé à chaque instant par un tel moteur n'a pas le caractère pulsatoire, dû à la périodicité du courant, que nous avons signalé pour le moteur synchrone à simple phase.

Si, toutefois, au cours de chaque demi-période, le couple varie légèrement, cette variation est due à des balancements de la partie mobile de part et d'autre de son mouvement moyen.

Comme pour le moteur à simple phase, si ces balancements ne peuvent s'amortir et s'amplifient, il y a une limite à partir de laquelle le couple de rappel devient insuffisant, et la partie mobile s'arrête en provoquant une élévation exagérée de l'intensité des courants dans l'induit.

Le même arrêt subit peut se produire par l'effet d'une surcharge, sans balancements préalables.

Les moteurs synchrones polyphasés sont plus répandus que les moteurs synchrones à simple phase.

Leur mise en marche peut être effectuée soit par un moteur auxiliaire électrique ou autre, soit par le moyen d'un circuit auxiliaire de forme rudimentaire (cage d'écureuil), disposé à la périphérie des inducteurs, et dans lequel le flux tournant induit un courant ; ce circuit tend à suivre la rotation du flux en entraînant les inducteurs, et, à une vitesse voisine du synchronisme, on peut, en excitant ceux-ci, mettre en régime synchrone ou *accrocher* la partie mobile.

Les réseaux qui ont surtout pour objet la distribution de l'énergie sous forme mécanique sont jusqu'à présent à courants polyphasés et non à simple phase.

Les moteurs synchrones polyphasés sont plus légers (de 15 à 20 0/0 environ) que les moteurs synchrones à simple phase. On peut les adapter partout où convient une vitesse constante, pour les transmissions d'atelier en particulier, et les accoupler aussi avec d'autres moteurs sur une même transmission (facilité de mise en marche).

Ils peuvent agir pour améliorer le facteur de puissance d'un réseau. On les utilise fréquemment dans les postes de transformation, comme moteurs-générateurs.

Enfin les commutatrices ou convertisseurs de courants alternatifs polyphasés en courant continu sont des moteurs synchrones d'un fonctionnement particulier.

3° Moteurs asynchrones polyphasés. — Si, dans un moteur du type précédent (synchrone polyphasé), on remplace le système d'électro-aimants à courant continu par une armature en fer munie de circuits élémentaires convenablement disposés et fermés sur eux-mêmes, le flux tournant induit un courant alternatif dans chacun de ces circuits, et l'action de ces courants sur le flux peut donner naissance à un couple.

L'armature tend à suivre le flux : si le couple résistant était rigoureusement nul, l'armature suivrait le flux sans glissement.

A mesure que le couple résistant augmente, le glissement s'accroît jusqu'à une limite à partir de laquelle l'armature s'arrête.

Cette limite du décrochement est due à l'exagération des courants induits dans l'armature et qui réagissent sur le flux inducteur.

Ce phénomène ne permet pas aux moteurs ayant des armatures

constituées comme il est dit ci-dessus de démarrer en charge.

En 1890, M. Maurice Leblanc eut l'idée de réunir ces circuits élémentaires entre eux, puis à des bagues isolées et montées sur l'arbre, et, par ce moyen, d'introduire dans les circuits des résistances non inductives, lors du démarrage, quand le glissement est maximum. On peut ainsi maintenir les courants induits dans l'armature au-dessous de telle limite qu'on veut, avec un décalage minimum par rapport à la force électromotrice engendrée par le flux tournant.

Le couple au démarrage peut ainsi atteindre la même valeur maxima que quand l'armature a atteint son régime de vitesse, après suppression des résistances et mise en court-circuit des circuits de l'armature.

Le procédé de M. Maurice Leblanc est universellement adopté pour le démarrage des moteurs polyphasés asynchrones.

M. Boucherot, plus récemment (1896), a imaginé et réalisé deux procédés de démarrage en charge [1].

L'un de ces procédés consiste à disposer sur une même armature induite deux ou plusieurs [2] enroulements de constantes de temps très différentes (un enroulement possédant une résistance élevée avec une faible self-induction, un autre enroulement avec une résistance moindre et une self-induction plus élevée, et les autres enroulements comportant une diminution graduelle de la résistance avec un accroissement graduel de la self-induction).

Le couple de démarrage est fourni naturellement par l'enroulement le plus résistant et le moins inductif et le couple à l'allure normale par l'enroulement le moins résistant et le plus inductif. Les moteurs ainsi établis peuvent donc démarrer en charge, et être mis en marche à distance, par la simple fermeture du circuit inducteur.

L'autre procédé de M. Boucherot consiste dans l'emploi de deux systèmes inducteurs agissant sur deux armatures induites juxtaposées, montées sur le même arbre et dont les enroulements sont couplés en parallèle à demeure sur une résistance non inductive (les génératrices des deux enroulements aboutissant à une bague de maillechort formant résistance). L'un des deux systèmes inducteurs peut être déplacé angulairement autour de l'axe commun, de telle

---

(1) *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, p. 68 et suiv. : 1898.
(2) Trois constituent un maximum pratique.

façon que les courants engendrés dans les induits peuvent être de sens contraires, de même sens ou de sens relativement variables entre ces extrêmes.

Quand les courants sont en opposition (sens contraire), la bague de maillechort leur fournit une dérivation non inductive : on a ainsi la position qui donne le couple maximum de démarrage. Celui-ci une fois effectué, on donne graduellement à l'inducteur mobile la position qui induit des courants de même sens dans les deux armatures. Dans cette dernière position la bague de maillechort, réunissant des points à chaque instant au même potentiel, n'est parcourue par aucun courant, et la faible fréquence du glissement n'induit pas un courant exagéré dans l'armature : le régime normal est établi.

Par suite du déplacement de l'un des systèmes inducteurs, la mise en marche à distance n'est pas réalisable.

Toutefois, à ce déplacement matériel peut être substitué, dans certains cas (démarrages faciles), un changement de polarité des enroulements par simple inversion des connexions de ceux-ci. Cette inversion fait franchir d'un coup un pas polaire aux polarités. Ce dispositif, qui n'est pas toujours admissible, permet la mise en marche à distance.

La mise en marche effectuée, et l'allure de régime atteinte, la vitesse angulaire d'un moteur asynchrone ne varie que de quelques centièmes entre la marche à vide et la marche à la charge limite du décrochement. Complètement à vide, le moteur tournerait au synchronisme du courant d'alimentation ; en charge croissante, le moteur s'écarte de ce synchronisme d'un glissement croissant qui ne dépasse pas l'ordre de grandeur indiqué plus haut.

Il en résulte que tout moteur asynchrone fonctionne normalement à une vitesse pratiquement constante.

L'introduction de résistances non inductives dans les circuits d'un induit polyphasé par l'intermédiaire de bagues, suivant leprocédé de M. M. Leblanc, permet de faire varier la vitesse de cet induit depuis le repos jusqu'à l'allure maxima.

Mais ce procédé n'est pas économique ; il est, quant à la consommation d'énergie dissipée en pure perte qui en résulte, rigoureusement analogue au procédé de démarrage par rhéostat des moteurs à courant continu.

Il n'est donc applicable qu'aux variations de courte durée, comme celles auxquelles donnent lieu les démarrages.

Il existe d'autres procédés moins onéreux, c'est-à-dire donnant lieu à un meilleur rendement, mais ces procédés ne sont ni simples ni complètement satisfaisants.

Le plus ancien de ces procédés consiste à modifier le nombre des pôles de l'inducteur par un changement de couplage des enroulements. On peut, par exemple, par le simple jeu des connexions, réduire de 16 à 8 les nombres des pôles d'un moteur et doubler ainsi la vitesse angulaire du champ tournant inducteur.

Un autre procédé plus récent consiste à coupler de diverses façons les éléments inducteurs et induits de deux moteurs reliés mécaniquement (calés sur le même arbre ou accouplés par engrenages). Le cas le plus simple de ce procédé est celui où l'induit de l'un des moteurs A est relié électriquement à l'inducteur de l'autre moteur B, les deux induits étant calés sur le même arbre, et les deux inducteurs comportant respectivement le même nombre de pôles. On voit ce qui se passe dans ce couplage en cascade : l'inducteur de A reçoit son courant de la ligne, et son champ entraîne l'induit, qui se comporte comme un générateur de courant alternatif polyphasé à la fréquence du glissement. Ce courant polyphasé alimente l'inducteur de B, dont le flux entraîne l'induit correspondant. Les induits de A et de B étant calés sur le même arbre ont nécessairement à chaque instant même vitesse angulaire absolue : d'où l'équation de condition qui donne pour la valeur de la vitesse commune un peu moins que la moitié de la vitesse qui correspondrait au synchronisme des courants de la ligne. Si les deux moteurs n'ont pas respectivement le même nombre de pôles, la vitesse résultante est exactement celle qu'on obtiendrait, toutes conditions égales d'ailleurs, avec un moteur unique ayant un nombre de pôles égal à la somme algébrique des pôles des deux moteurs.

On comprend donc qu'on puisse ainsi réaliser différents couplages, donnant lieu à différentes vitesses.

Les locomotives électriques du chemin de fer de la Valteline [1] (Italie) comportent sur chacun de leurs bogies ou trucks deux moteurs dont l'un a son inducteur toujours alimenté par la ligne et dont l'autre a son inducteur alimenté par l'induit du premier lors des démarrages et pour les faibles vitesses. Des résistances introduites dans les circuits des enroulements du deuxième induit, au moyen de bagues et

---

[1] *Société internationale des Électriciens*, p. 96 et suiv. : 1903.

de frotteurs, permettent d'abaisser la vitesse à telle valeur qu'on veut.

Pour marcher à la vitesse maxima, on supprime le couplage en cascade et on met peu à peu en court-circuit l'induit du premier moteur ; le deuxième moteur reste alors inutilisé. L'invention de ce mode de couplage est attribuée à M. Goerges.

Enfin on peut alimenter un moteur donné par des courants de fréquences variées et appropriées aux vitesses qu'on veut obtenir.

Dans ce but, il faut disposer de différentes sources de courant polyphasé à différentes fréquences et sous des tensions proportionnelles respectivement à ces fréquences.

En fait, la question de prix de premier établissement étant mise à part, il n'y a aucune difficulté à établir dans une usine des alternateurs de fréquences différentes et des lignes séparées pour les desservir. Si les démarrages des moteurs sous charge sont répétés et si les allures doivent être constamment variées, il peut y avoir avantage à adopter ce dispositif, qui est l'équivalent du système à tensions étagées que nous avons indiqué pour le courant continu. M. Boucherot a employé à la sucrerie d'Escaudœuvres, près Cambrai, les trois fréquences 21, 35 et 50 pour la mise en marche (et le freinage) des moteurs des essoreuses (¹).

On peut freiner électriquement avec un moteur asynchrone, mais dans des conditions étroites, à une allure très voisine du synchronisme, et en laissant l'inducteur relié à la ligne.

M. Maurice Leblanc a le premier indiqué que, dans ces conditions, le moteur entraîné devient une génératrice asynchrone de courant alternatif ; le couple résistant qu'elle oppose à l'entraînement donne la mesure du freinage.

Une locomotive descendant une rampe avec ses moteurs asynchrones reliés à la ligne pourra donc prendre une allure de régime constant ; l'énergie qu'elle engendre sera communiquée à la ligne, comme celle qui est communiquée à celle-ci par l'usine génératrice.

Les lignes de chemins de fer à traction par courants polyphasés, et qui sont, pour la plupart, à fortes rampes, emploient régulièrement ce mode de freinage.

Les locomotives de chemins de fer à crémaillère du Gornergrat (1898) et de la Jungfrau (1899) descendent avec ce procédé

(¹) *Société internationale des Électriciens*, p. 476 et suiv. ; 1902.

des rampes de 25 0/0, sans faire usage des freins mécaniques en dehors des arrêts.

Il en est de même du chemin de fer de la Valteline, dont nous avons parlé plus haut, et dont les locomotives ont deux régimes de vitesse à la descente, suivant qu'elles emploient ou non pour cet usage le couplage en cascade.

Dans la distribution citée plus haut, M. Boucherot a mis à profit les trois fréquences pour opérer successivement trois freinages étagés.

L'entrefer des moteurs asynchrones doit être aussi faible que possible : les circuits primaire et secondaire, c'est-à-dire l'inducteur et l'induit, devraient être séparés par une réluctance négligeable. Il n'en peut être ainsi, et les entrefer varient de 4 à 5 dixièmes de millimètre pour les moteurs de faible puissance, jusqu'à 1 et 2 millimètres pour les moteurs de plusieurs centaines de kilowatts. Il en résulte pour ceux-ci une certaine difficulté de construction.

L'inducteur d'un moteur asynchrone est désigné assez communément sous le nom de *stator*, bien qu'on puisse le concevoir mobile ; l'induit est désigné sous le nom de rotor, bien qu'il puisse être fixe.

Ces désignations sont dues aux Anglais : malgré leur caractère de définition pouvant comporter des exceptions, elles sont passées dans la pratique courante.

4° Moteurs asynchrones a simple phase. — Supposons que, dans un moteur asynchrone diphasé fonctionnant normalement, on interrompe le circuit de l'une des phases de l'inducteur ou stator : l'induit ou rotor continuera à tourner si le couple résistant n'est pas trop élevé [1]. On réalise ainsi un moteur asynchrone à simple phase.

L'induit y est entraîné par la rotation d'un flux résultant du flux de l'inducteur et du flux engendré par les courants de l'induit : le flux résultant tourne au synchronisme des courants d'alimentation ou inducteurs, et sa grandeur varie légèrement dans le cours d'une demi-période.

Un tel moteur, dont l'induit aurait ses enroulements fermés en court-circuit sur eux-mêmes, ne pourrait démarrer sans secours.

---

[1] La suppression du courant dans une phase d'un moteur triphasé est opérée systématiquement dans la traction, aux croisements et aux aiguillages de la ligne aérienne, pour permettre en ces points l'emploi d'un seul fil de trolley les rails étant utilisés comme conducteurs.

En effet, ces enroulements seraient parcourus par des courants intenses (cas du secondaire en court-circuit d'un transformateur) et tendraient à annuler le flux inducteur.

Le procédé le plus communément employé pour la mise en marche de ces moteurs consiste à disposer sur l'inducteur un enroulement auxiliaire disposé par rapport à l'enroulement principal, comme le deuxième enroulement d'un moteur diphasé. Cet enroulement doit comporter un grand nombre de spires et être relativement résistant.

Au moment du démarrage, on branche en dérivation sur les deux conducteurs du courant à simple phase :

1° L'enroulement auxiliaire ;

2° L'enroulement principal, auquel on a ajouté en série une self-induction appropriée, de telle façon que le courant dérivé qui passe dans cet enroulement ne soit pas très différent du courant qui passe dans l'enroulement auxiliaire.

Ces deux courants sont, en vertu de la composition des deux circuits qu'ils parcourent, l'un très résistant, l'autre très inductif, décalés d'un angle qui tend vers 90° ; il en résulte un flux tournant.

Si l'induit a ses enroulements fermés en court-circuit et très peu résistants, ce flux tournant ne suffit pas à le mettre en mouvement ; il faut alors employer le dispositif d'enroulements aboutissant à des bagues et à des frotteurs reliés à des résistances non inductives, suivant le procédé de M. Maurice Leblanc.

Le démarrage peut alors être effectué, mais avec un couple moteur peu élevé, en raison de la faible valeur du flux inducteur résultant des courants qui parcourent les deux circuits inducteurs, dont l'un est résistant et l'autre inductif.

La mise en marche obtenue, on supprime le courant dans la phase auxiliaire, et on met en court-circuit les enroulements induits.

On trouvera des descriptions d'autres procédés de mise en marche, comme celui de M. Heyland (phase auxiliaire constituée par un enroulement fermé sur lui-même), qui permet de démarrer en charge, de même que l'emploi de moteurs dont l'induit porte un collecteur, et est relié à l'inducteur comme dans une dynamo à courant continu en série ; une fois la mise en marche réalisée, on met en court-circuit les enroulements de l'induit, et celui-ci est entraîné par l'induction d'un champ tournant ; mais ces procédés sont moins répandus que le précédent.

On voit que ces moteurs à simple phase ne peuvent être d'un usage aussi satisfaisant que les moteurs polyphasés.

Cette infériorité a conduit à l'adoption des courants polyphasés dans les distributions d'énergie sous forme mécanique.

On doit à M. Maurice Leblanc la première démonstration de la possibilité de réaliser de tels moteurs (1), et probablement à M. C.-E. Brown leur première réalisation dans la forme actuelle (2).

La théorie analytique du fonctionnement de ces moteurs, ainsi que des moteurs à flux tournant produit par des courants polyphasés, a été établie par M. A. Potier en 1894 (3).

Cette analyse a servi de base aux recherches de même nature effectuées depuis cette époque.

5° Moteurs a collecteur en série. — Le moteur à courant continu à inducteurs en série constitue un véritable électrodynamomètre à noyau de fer ; comme le courant continu, le courant alternatif y développe un couple qui tend à déplacer les deux circuits l'un par rapport à l'autre.

On conçoit donc qu'un moteur-série puisse fonctionner alimenté par un courant alternatif.

Il y a de longues années qu'on a montré la possibilité de ce fonctionnement avec des moteurs de quelques kilogrammètres (2 ou 3) ; pour des puissances supérieures, l'expérience était moins satisfaisante et ne donnait rien qui fût pratique ; elle fut longtemps abandonnée et presque oubliée.

Un électrodynamomètre à noyau de fer serait d'un usage peu satisfaisant pour le courant continu, et inadmissible pour le courant alternatif : hystérésis, courants de Foucault et self-induction rendraient l'appareil impraticable. Dans l'emploi du moteur à collecteur en série avec le courant alternatif, à ces inconvénients vient s'ajouter le fonctionnement naturellement défectueux des balais (4).

Quoi qu'on fasse, la perte par hystérésis dans le noyau de fer ne

---

(1) *Lumière électrique*, p. 419 et suiv. ; 30 mai 1891 ; p. 371 et suiv. ; 25 février 1893.

(2) *The Electrician*, 27 janvier 1893.

(3) *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, p. 248 et suiv. ; 1894 : *Sur les moteurs à induit fermé sur lui-même.*

(4) Les spires en court-circuit sous balais subissent l'induction du flux alternatif de l'inducteur, et se comportent comme des spires d'un transformateur en court-circuit pendant un temps très court, qui est celui de la commutation.

peut être éliminée. Les courants de Foucault peuvent être réduits à un minimum admissible par l'emploi d'un circuit magnétique en feuilles de tôle mince (de 3 à 5 dixièmes de millimètre d'épaisseur).

La self-induction pourrait être amoindrie et combattue de différentes façons, dans le circuit inducteur et dans le circuit induit ; les procédés théoriques ne manquent pas : ils se restreignent à l'usage.

Vers 1893, Dery et Blathy contruisirent des moteurs en série à inducteurs feuilletés [1], dont les intervalles polaires étaient munis de circuits amortisseurs du genre de ceux que M. Maurice Leblanc avait préconisés un peu avant (1892), et qui avaient pour but d'améliorer le fonctionnement des balais [2].

Ces moteurs, démarrant en charge et s'adaptant aux fréquences usuelles de 40 à 50, ont rendu des services, pendant une dizaine d'années, dans certains cas, comme celui des ascenseurs, bien que le facteur de puissance et le fonctionnement des balais y fussent en général peu satisfaisants ; le poids et le prix de ces moteurs étaient élevés.

L'étude de la traction par courant alternatif à simple phase (emploi de transformateurs statiques sans surveillance échelonnés le long de la ligne pour la distribution à basse tension ; emploi d'un seul fil de trolley), entreprise de différents côtés dans ces dernières années, a ramené de nouveau l'attention sur le moteur série à collecteur, démarrant sous charge et pouvant fonctionner à une allure variable [Finzi [3], Lamme-Westinghouse].

Pour améliorer le facteur de puissance, le fonctionnement des balais et diminuer le poids, on a eu recours, dans la traction, à des fréquences peu élevées (de 15 à 18 au lieu de 40 à 50 dans les réseaux de distributions ordinaires).

On a pu obtenir ainsi des facteurs de puissance de 0,80 environ avec un fonctionnement de balais comparable à celui des moteurs à courant continu.

La mise en marche des moteurs en série à courant alternatif peut être effectuée pour l'intercalation dans le circuit d'une self-induction à spires variables (ou autotransformateur), qui permet de réduire au minimum l'effet Joule au démarrage (suppression du rhéostat). Il en résulte une économie d'énergie d'autant plus appréciable par rapport

---

(1) *Lumière électrique*, vol. XLIX, p. 151 ; 1893.
(2) Les balais en charbon venaient de faire à point leur apparition.
(3) *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, p. 299 et 436 ; 1903.

à l'emploi du courant continu que les démarrages sont plus fréquents.

Enfin, si le fonctionnement des balais a été rendu pratique, c'est que, à part la réduction de la fréquence, on a fait usage, pour l'améliorer, de divers procédés, la plupart déjà proposés pour les dynamos à courant continu [grand nombre de lames au collecteur, résistance électrique élevée des connexions des sections de l'induit, enroulements compensateurs du genre Ryan [1], etc.

On a, sans trop de complications, réalisé des moteurs série fonctionnant alternativement avec du courant continu et avec du courant alternatif : M. Steinmetz a exécuté des moteurs de tramways qui, dans la ville de Schenectady, fonctionnent avec du courant continu, et, en dehors, avec du courant alternatif.

6° Moteurs a répulsion. — A l'Exposition de 1889, un moteur de M. Elihu Thomson, muni d'un collecteur et de balais, fonctionnait avec du courant alternatif simple [2] ; son aspect était celui d'une dynamo bipolaire à courant continu.

L'inducteur seul était excité par le courant alternatif ; l'induit, muni d'un enroulement ordinaire pour courant continu, avait ses balais réunis en court-circuit par un conducteur. La position de ces balais sur le collecteur ne correspondait ni à la ligne neutre interpolaire, ni à la ligne des pôles à 90° de la première, mais à une position presque rigoureusement intermédiaire entre les deux précédentes. Le sens du mouvement de l'induit était tel que les contacts des balais se trouvaient en arrière de la ligne neutre. Au démarrage, le couple était important, la vitesse variait avec la charge, et le fonctionnement des balais n'était pas sans étincelles.

A une certaine vitesse, M. Elihu Thomson mettait en court-circuit toutes les sections de l'induit ; celui-ci continuait à tourner, et les balais pouvaient être relevés.

Ce spécimen de moteur, malgré ses propriétés intéressantes, mais peu comprises à cette époque, ne parut pas au point pour la pratique et n'y entra pas.

Depuis peu, la recherche du moteur à courant alternatif simple

---

(1) Enroulement fixe bobiné sur les pièces polaires autour de l'induit et comportant le même nombre d'ampères-tours que celui-ci. Voir Ficher-Hinnen, p. 203 ; 1897, Zurich.

(2) Silvanus et P. Thompson, *Courants polyphasés*, traduction Boistel, édition 1896, p. 195.

tend à faire revivre sous des formes mieux étudiées le moteur dit *à répulsion* d'Elihu Thomson.

Reprenons le type bipolaire de 1889. L'inducteur, seul excité par le courant de la ligne, constitue, en réalité, le circuit primaire d'un transformateur dont le secondaire est l'enroulement de l'induit.

Si on cale les balais suivant la ligne neutre, à 90° de la ligne des pôles, aucun courant ne se développera dans l'induit, les balais réunissant, par leur court-circuit, des points au même potentiel.

Si on cale les balais suivant la ligne des pôles, un courant intense traversera le court-circuit, alimenté par les deux moitiés de l'induit qui se comporteront comme deux éléments secondaires d'un transformateur mis en parallèle par un conducteur court et de forte section.

Dans le premier cas (calage sur la ligne neutre et courant nul), aucun couple ne tendra à déplacer l'induit; il en sera de même dans le second cas (calage sur la ligne des pôles), en raison de la production de courants intenses dans les deux parties symétriques de l'induit par rapport à la ligne des pôles.

Si on fait varier le calage des balais entre les deux positions extrêmes, en partant de l'une d'elles, un couple prend naissance qui croît jusqu'à un maximum pour décroître ensuite jusqu'à s'annuler.

Le calage pratique sera donc celui qui correspond au couple maximum.

Dans cette position, une composante importante des courants de l'induit se trouve en phase avec le flux de l'inducteur.

A la vitesse du synchronisme, la commutation est théoriquement parfaite. Au-dessus et au-dessous du synchronisme, les sections en court-circuit sous les balais subissent une induction dont nous avons déjà parlé à propos du moteur série à courant alternatif.

La vitesse varie avec la charge et s'accélère quand celle-ci diminue.

L'aspect d'un moteur à répulsion est généralement, aujourd'hui, celui d'un moteur polyphasé dont l'induit porterait un enroulement à collecteur.

L'inducteur ou stator n'a pas de pôles saillants ; l'enroulement y est réparti sur toute la circonférence. Les conducteurs du stator parallèles aux conducteurs de l'induit ou rotor, dont ils ne sont éloignés que de la valeur de l'entrefer, tendent à annuler — ou *compenser* — la réaction de l'induit, comme l'enroulement compensateur Ryan,

dans une dynamo à courant continu. L'entrefer est celui d'un moteur polyphasé.

On conçoit que l'induit d'un moteur à répulsion ainsi construit puisse comporter une mise en court-circuit de ses sections à une vitesse voisine du synchronisme, et fonctionner alors en moteur asynchrone (moteurs Wagner, *Exposition de Saint-Louis*, 1904).

Il est remarquable que M. E. Thomson ait réalisé ce fonctionnement (sections en court-circuit, marche asynchrone) avec son moteur imparfait de 1889.

Les moteurs à répulsion actuels ont à peine pris rang dans l'industrie; mais, comme ils développent aux démarrages des couples comparables aux couples que développent les moteurs en série, comme leur facteur de puissance, à l'allure normale, peut atteindre une valeur élevée, et qu'ils ont, de plus, l'avantage de fonctionner aux fréquences usuelles (40 à 50), leur étude s'impose au moins au même titre que l'étude du moteur série et que celle du moteur compensé.

7° Moteur compensé. — Prenons le moteur à répulsion du dernier style; établissons l'enroulement de l'induit ou rotor de façon qu'il puisse supporter sans inconvénient le courant qui passera dans l'inducteur ou stator; disposons sur le collecteur, aux extrémités du diamètre neutre interpolaire, deux lignes de balais reliées respectivement au stator et à la ligne comme dans un moteur en série, puis deux autres lignes de balais aux extrémités du diamètre correspondant a l'axe des pôles, ces deux dernières lignes de balais étant réunies par un court-circuit, comme dans le moteur à répulsion.

On aura ainsi la structure générale du moteur dit *compensé*, tel que l'a présenté M. M. Latour [1].

Si on lance un courant alternatif simple dans les deux circuits en série (stator et rotor), le démarrage s'effectuera comme dans un moteur en série. Le fonctionnement des balais reliés au circuit du stator et à la ligne ne donnera lieu à aucune étincelle [2]; il n'en sera pas de même des balais réunis en court-circuit, qui cracheront légè-

---

[1] *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, p. 299 et suiv.; 1903 : *Nouveau matériel à courant alternatif simple*, par M. M. Latour; — *l'Industrie électrique*, p. 269; 1905 : *Traction électrique par moteurs Latour*.

[2] Ce qui n'est pas au démarrage d'un moteur série ordinaire à courant alternatif simple.

rement jusqu'à ce que la vitesse ait acquis une certaine valeur. Au synchronisme, tout crachement disparaît et les différentes lignes de balais ont un égal aspect.

A ce moment le rotor se comporte comme un véritable inducteur; car il donne lieu à un flux tournant et on ne constate entre les lignes de balais qu'une chute ohmique due à la résistance des spires, sans aucune force électromotrice. La réaction du flux tournant sur les spires du stator produit le couple moteur. A la vitesse du synchronisme et pour cette seule valeur, le facteur de puissance est égal à l'unité.

La théorie du fonctionnement de ce moteur est complexe : elle n'est pas complètement établie, mais on peut concevoir assez simplement le résultat de la composition des courants, la composition des flux et de la *compensation* qui réagit sur le fonctionnement des balais. La vitesse du moteur compensé, enroulé en série, varie avec la charge, et s'accélère quand celle-ci diminue; M. M. Latour a indiqué qu'on pouvait réaliser des moteurs compensés à inducteur ou stator en dérivation et dont la vitesse varie aussi peu avec la charge sous tension constante que celle d'un moteur en dérivation à courant continu dans le même cas.

Plusieurs moteurs compensés Latour ont été construits depuis deux ans [moteurs d'appareils de levage et de traction (1)]. Leur développement est actuellement comparable à celui des moteurs série et des moteurs à répulsion.

MM. Winter et Eichberg ont construit des moteurs qui ne diffèrent du précédent que par un détail de réglage, et ont ainsi équipé les deux lignes de traction à courant alternatif simple de Niederschonweide (Allemagne) et de la vallée de la Stubaï (Fulpnels-Innsprück) (2) fonctionnant depuis l'année dernière.

POIDS D'UN MOTEUR DE 100 KILOWATTS.

Comme exemple, nous donnerons le poids d'un moteur de type courant, c'est-à-dire commercial, tel qu'il figure dans les catalogues des constructeurs, pour chacun des types décrits ci-dessus, sauf les

(1) Essai de traction à Paris-Malakoff. — Traction de la ligne du Borinage.

(2) *Industrie électrique*, p. 133; 1905 : — *Chemin de fer à courant alternatif simple de la vallée de la Stubaï.*

trois derniers (moteurs à collecteurs à courant alternatif simple) dont la pratique n'est pas encore suffisamment répandue.

Il s'agit d'un moteur pouvant recevoir indéfiniment, sans arrêt, 100 kilowatts à ses bornes, et rendre 0,90 à 0,92 de cette puissance sur son arbre :

Moteur synchrone à simple phase.....	4.600	kilogrammes
— asynchrone à simple phase....	4.350	—
— synchrone polyphasé.....	3.900	—
— à courant continu.....	3.300	—
— asynchrone polyphasé.....	3.100	—

Ces poids ne sont qu'approximatifs et peuvent comporter quelques variations, en particulier si on adapte un même type à des tensions différentes (foisonnement de l'isolement des conducteurs agissant sur les dimensions générales, variation de la longueur et du nombre des lames du collecteur).

Si on veut alléger exceptionnellement un moteur de 100 kilowatts en réduisant au minimum tout ce qui est en dehors du circuit magnétique et des conducteurs, on peut obtenir des poids moindres que les précédents, mais la construction devient relativement coûteuse par suite de l'accroissement de la main-d'œuvre (exagération des surfaces travaillées) ; il en est de même si on pousse l'allure au delà de la limite de sécurité qu'il est prudent de ne pas franchir en service ininterrompu.

Ce dernier cas est celui des moteurs de traction et des moteurs destinés aux appareils de levage, dont le fonctionnement est, par essence, intermittent.

Les moteurs de traction méritent une mention spéciale.

Ils sont, en général, complètement enfermés (cuirassés, blindés) ; leur refroidissement est difficile. De plus, en raison du faible espace qui leur est réservé sous le châssis du véhicule, entre les roues; leurs dimensions sont relativement restreintes, et, d'autre part, leur poids doit être aussi faible que possible ; il en résulte que ces moteurs sont naturellement *poussés*. Ainsi, par exemple, un moteur de traction à courant continu destiné à recevoir au maximum 100 kilowatts à ses bornes ne pèsera que 2.500 kilogrammes. Mais il sera entendu que cette puissance de 100 kilowatts ne sera pas absorbée sans interruption. Étant donnée l'absence de ventilation de ces moteurs enfermés, les cahiers des charges n'exigent qu'une épreuve de trois quarts

d'heure à une heure à la puissance maxima. La puissance qu'ils pourraient supporter indéfiniment, sans ventilation artificielle [1], est inférieure à la moitié de la puissance maxima, en admettant que les inducteurs sont en série et subissent à faible charge la même diminution de courant que l'induit.

EMPLOI DES MOTEURS ÉLECTRIQUES.

Comme on vient de le voir, les moteurs électriques sont légers : il s'ensuit que leur prix d'achat est peu élevé. Leur entretien est facile. Leur rendement moyen laisse loin derrière lui les rendements des récepteurs à vapeur, à air comprimé et même à eau sous pression [2] ; les canalisations électriques, d'un établissement facile, ne prélèvent qu'un faible pourcentage de l'énergie qu'elles transportent.

Les distributions d'énergie électrique présentent une somme d'avantages que ne possède aucun des autres modes de distribution de l'énergie mécanique, et on comprendra que ces derniers ne soient plus appliqués que dans un petit nombre de cas particuliers.

Les transmissions d'une usine, telles qu'on les décrit classiquement, comportent des arbres de couche, des poulies et des courroies pour relier la machine motrice aux machines opératoires. Celles-ci sont mises en action ou arrêtées au moyen de débrayages, les arbres de couche tournant toujours à une vitesse sensiblement constante.

Le coefficient d'activité d'une machine opératoire est le rapport du temps pendant lequel cette machine est en action, c'est-à-dire travaille utilement, au temps total pendant lequel tournent les arbres de transmission de l'usine. Ainsi, par exemple, si ces arbres tournent 12 heures par jour, et si, par jour, une machine opératoire n'est employée utilement que pendant 6 heures, son coefficient d'activité est $\frac{1}{2}$.

Plus ce coefficient d'activité est élevé, meilleure est l'utilisation de la transmission.

---

(1) Celle-ci sera indispensable lorsque les trains à traction électrique effectueront des parcours de plus de trois quarts d'heure à une heure sans arrêt et en pleine charge.

(2) Les moteurs pour eau sous pression à cylindre et piston exigent toujours le même travail, estimé en amont de la valve d'admission, par cylindrée, quel que soit le travail résistant correspondant. D'où un rendement décroissant à mesure que la charge diminue.

Cette utilisation se manifeste dans la dépense de combustible : le rendement réel des transmissions de l'usine devra donc être établi en tenant compte des termes suivants :

1° Perte de puissance, par les transmissions quand les machines opératoires sont en action ;

Cette perte de puissance détermine le *rendement mécanique* ρ des transmissions ;

2° Perte de puissance par les transmissions en mouvement, les machines opératoires n'étant pas en action ;

3° Coefficient d'activité $\frac{1}{k}$ du temps total pendant lequel tournent les transmissions ; ce temps total (journée de travail, par exemple). peut être pris pour unité.

En conséquence, les transmissions donnent lieu à un rendement ρ pendant un temps $\frac{1}{k}$, et pendant le reste du temps, qui a pour valeur $1 - \frac{1}{k}$, elles débitent une puissance sans effet utile. Le rendement réel des transmissions, évalué pour toute la durée de l'unité de temps, peut être donné assez approximativement par la formule

$$\rho \frac{1}{1 + (k - 1)(1 - \rho)}$$

que nous avons établie il y a quelques années [1].

Cette formule permet de comparer les mérites respectifs d'une transmission purement mécanique et d'une distribution électrique.

Pendant le temps $1 - \frac{1}{k}$, cette dernière ne donne lieu à aucune perte de puissance, le courant étant interrompu. Cette propriété est particulièrement favorable à l'emploi des moteurs électriques. Il en est de même quand la longueur des transmissions mécaniques augmente.

Pour compléter, dans un avant-projet, la comparaison d'une transmission mécanique et d'une distribution électrique, il y a lieu d'évaluer en outre les dépenses totales de premier établissement dans les deux cas. Malgré la hausse récente du cuivre, dont le prix s'est

---

[1] *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale : les Transmissions électriques dans les ateliers*, par A. Hillairet, décembre 1895.

accru de 50 0/0 au cours de cette année, le prix des moteurs et des canalisations est tel qu'on rencontrerait difficilement aujourd'hui un établissement industriel sans distribution électrique.

Les instruments de mesure les plus simples, ampèremètres, voltmètres, wattmètres à lecture directe, compteurs d'énergie et enregistreurs, permettent de déterminer la puissance à chaque instant aux bornes d'un générateur de courant, d'une distribution ou d'un moteur. Cette détermination est plus simple et plus exacte s'il s'agit de courant continu que pour toute autre forme de courant.

Si un moteur a été préalablement taré, c'est-à-dire si on en a vérifié le rendement dans des conditions de fonctionnement très diverses, on peut s'en servir comme d'un véritable dynamomètre de transmission.

Ce dernier appareil, réalisé sous les formes les plus variées, et le plus souvent sans succès[1], au cours du siècle dernier, est demeuré comme une curiosité sans caractère industriel; en quelques années, les moteurs électriques nous ont apporté les renseignements dynamométriques les plus complets et les plus exacts qu'on puisse demander industriellement.

Nous pouvons relever actuellement, dans ses moindres variations, le régime de la puissance absorbée par les machines opératoires : l'avant-projet d'une usine ne comporte plus, sous ce rapport, ni évaluation fantaisiste, ni aléa.

L'usine en marche, les opérations peuvent être suivies et réglées avec une exactitude inconnue jusqu'à l'apparition des moteurs électriques.

L'atelier, l'usine, le chantier, la mine, le navire qui possèdent des machines motrices peuvent y atteler des machines génératrices de courant électrique et en distribuer l'énergie à leurs différents services.

Les machines motrices thermiques sont d'un établissement coûteux; leur surveillance exige un personnel expérimenté et attentif et leur consommation relative s'accroît quand leur importance diminue. Si leur activité ne s'étend que sur une faible fraction de l'année, leur usage devient impossible dans certains cas, comme par exemple dans les exploitations agricoles de moyenne importance.

---

[1] La construction de dynamomètres à vitesse de rotation élevée présente des difficultés particulières d'étude et d'exécution.

Les puissantes distributions électriques qui commencent à se répandre pour alimenter des étendues de territoires correspondant à un ou plusieurs départements vont modifier profondément cette situation.

Il arrivera une époque, probablement assez rapprochée, où la surface entière de notre pays, comme d'ailleurs la surface de toute l'Europe et de bien d'autres régions, sera desservie par des réseaux de distribution d'énergie plus serrés que les réseaux télégraphiques et téléphoniques.

Peu à peu les plus grands établissements industriels, comme les plus modestes, trouveront avantage à se relier à ces distributions qui pourront, grâce à leur importance, débiter l'énergie électrique à bon compte, de quelque façon qu'elle soit obtenue, par le moyen de machines hydrauliques ou par le moyen de machines thermiques [1].

---

[1] Nous ne croyons pas au développement futur, si prôné par quelques économistes, des *ateliers de famille* comme conséquence du développement des distributions électriques. Au point de vue de la production industrielle, les ateliers de famille seront toujours dans une situation inférieure aux usines. Au point de vue hygiénique, leur multiplicité ne nous paraît pas désirable. On consultera avec intérêt, sur ce sujet, le rapport présenté, en 1902, à M. le Ministre de l'Industrie et du Travail du royaume de Belgique, par MM. Dubois et Julin (Bruxelles, 1902), et en particulier les pages 37, 93, 137, 181, 257, 259, 277, 279 dudit rapport. — Voir aussi : *la Transformation du travail par le moteur électrique ;* par M. Marc Mangini, imprimerie du *Stéphannois*, Saint-Etienne. 1904.

ÉTAT ACTUEL DE L'INDUSTRIE DES ACCUMULATEURS (1).

Par M. Jumau,
Ingénieur électricien.

Pour justifier le titre si général donné à cette conférence, je devrais non seulement vous exposer l'état actuel de nos connaissances sur l'accumulateur au point de vue théorique et au point de vue technique, mais encore décrire les différents types d'accumulateurs actuellement employés et enfin examiner les différentes applications auxquelles donnent lieu ces appareils.

Dans l'impossibilité de réaliser en si peu de temps un tel programme, je devrai me borner et j'ai pensé que la meilleure manière de mettre au point l'accumulateur dans son état actuel, c'est encore de l'étudier au point de vue tout à fait général de son fonctionnement. Ses qualités ressortent évidemment beaucoup mieux d'une telle étude que de la description que l'on peut faire des différents types actuellement construits.

Nous commencerons cette étude par l'accumulateur au plomb, qui est encore presque exclusivement le seul employé. Les conditions de fonctionnement de cet élément étant connues, nous passerons rapidement en revue les différents couples qui ont été proposés pour le remplacer, ce qu'aucun n'a encore réussi à faire, et enfin nous terminerons par quelques considérations générales relatives à la possibilité d'obtenir un accumulateur supérieur à l'accumulateur actuel afin de répondre aux exigences toujours croissantes de l'industrie électrique.

Avant d'entrer dans le domaine purement technique, nous dirons quelques mots de la théorie de l'accumulateur au plomb, ces dernières années ayant vu paraître un certain nombre de travaux sur la question.

Nous étudierons ensuite les différents facteurs de fonctionnement de l'accumulateur.

Rappelons ici qu'on appelle accumulateur électrique une pile qui possède la propriété d'être réversible, c'est-à-dire de pouvoir, après son épuisement, être régénérée dans son état initial par le simple passage d'un courant de sens inverse au courant de décharge. Cette

(1) Conférence faite le 23 mai 1905.

condition exige évidemment que les réactions chimiques soient les mêmes, mais de sens inverse pendant les deux opérations : décharge et charge. La dénomination d'accumulateur est imparfaite, puisqu'elle ne rend pas compte de la fonction de double transformation de cet appareil : transformation d'énergie chimique en énergie électrique pendant la décharge et d'énergie électrique en énergie chimique pendant la charge. La dénomination de pile ou couple réversible est certainement beaucoup plus correcte.

L'accumulateur au plomb, que nous allons tout d'abord étudier, est, comme on le sait, le couple réversible plomb, acide sulfurique, peroxyde de plomb.

Théorie de l'accumulateur au plomb. — Nous n'entrerons pas ici dans la discussion des différentes théories, que nous avons faite d'autre part [1].

Nous dirons seulement qu'au point de vue chimique les travaux les plus minutieux faits pendant ces dernières années viennent confirmer la double sulfatation d'après l'équation réversible :

$$Pb + 2H^2SO^4 + PbO^2 \rightleftarrows PbSO^4 + 2H^2O + PbSO^4.$$

Au point de vue thermodynamique, toute théorie doit être en accord avec l'équation d'Helmholtz :

$$E = \frac{W}{23091a} + T\frac{dE}{dT},$$

E étant la force électromotrice, W la quantité de chaleur (en calories g-d) dégagée, a la valence et $\frac{dE}{dT}$ le coefficient de température. Or la théorie de la double sulfatation donne un accord suffisant, étant donné le peu de précision des mesures thermochimiques. C'est ce que prouvent les nombreux essais entrepris depuis quelques années et dans lesquels on a comparé E mesuré directement à E calculé d'après les mesures de W et de $\frac{dE}{dT}$. L'affirmation que le plomb spongieux doit être dans un état allotropique du plomb tel que le dégagement de chaleur est beaucoup plus élevé que celui donné par le plomb ordinaire tombe devant l'expérience directe qui montre que le plomb ordinaire, à condition de n'être pas encore recouvert de sa

(1) L. Jumau, *Les Accumulateurs électriques*. H. Dunod et E. Pinat, éditeurs.

couche de sulfate, donne exactement la même force électromotrice que le plomb spongieux.

Un des faits théoriques les plus saillants de ces dernières années est certainement l'application de la théorie des ions à l'accumulateur au plomb. C'est à la théorie des ions que l'on doit l'explication satisfaisante du processus de charge et de décharge d'après la double sulfatation. Si l'on admet avec Le Blanc que le peroxyde de plomb possède une certaine solubilité dans l'eau, on a les réactions suivantes à la décharge :

(1) $$PbO^2 + 2H^2O = \overset{++++}{Pb} + 4\overset{-}{O}H$$

(2) $$\overset{++++}{Pb} + Pb + 2\overset{--}{SO}^4 = 2PbSO^4$$

(3) $$4\overset{-}{O}H + 4\overset{+}{H} = 4H^2O.$$

Le peroxyde en solution se dissocie en ions $\overset{++++}{Pb}$ tétravalents (1). Ces ions cèdent deux charges positives à la cathode, par le circuit extérieur, de sorte que celle-ci envoie à son tour des ions $\overset{++}{Pb}$ en solution qui s'unissent, comme les premiers redevenus bivalents, aux ions $\overset{--}{SO}^4$ (2). A la charge, on a les équations :

(4) $$2PbSO^4 \text{ solide} = 2\overset{++}{Pb} + 2\overset{--}{SO}^4$$

(5) $$2\overset{++}{Pb} = \overset{++++}{Pb} + Pb$$

(6) $$\overset{++++}{Pb} + 4\overset{-}{O}H = PbO^2 + 2H^2O$$

(7) $$4\overset{+}{H} + 2\overset{--}{SO}^4 = 2H^2SO^4.$$

Le sulfate de plomb envoie en solution des ions Pb bivalents aux deux pôles (4). Puis les ions bivalents de la positive prennent deux charges positives et passent à l'état d'ions tétravalents, tandis que les ions bivalents à la négative abandonnent leurs deux charges et se précipitent à l'état métallique (5). De même, à la positive, le peroxyde de plomb se reprécipite dès que la concentration des ions de plomb tétravalents atteint celle qui correspond à la limite de solubilité du peroxyde (6).

D'après Liebenow, on pourrait considérer la positive comme réversible par rapport aux ions $\overset{--}{PbO}^2$, de même que la négative est réversible par rapport aux ions $\overset{++}{Pb}$. A la décharge, la négative se comporte comme dans l'hypothèse précédente, pendant que les ions $\overset{--}{PbO}^2$ de la positive réagissent sur les ions $\overset{+}{H}$ d'après les équations :

$$\overset{--}{PbO}^2 + 4\overset{+}{H} = \overset{++}{Pb} + 2H^2O$$

et

$$\overset{++}{Pb} + \overset{--}{SO^4} = PbSO^4.$$

A la charge, les phénomènes inverses ont lieu, le sulfate de plomb se dissociant de la façon suivante :

$$2PbSO^4 + 2H^2O = \overset{++}{Pb} + 4\overset{+}{H} + \overset{--}{PbO^2} + 2\overset{--}{SO^4},$$

et les ions $\overset{++}{Pb}$ et $\overset{--}{PbO^2}$ cédant simplement leurs charges pour redonner le plomb spongieux et le peroxyde de plomb.

Force électromotrice de l'accumulateur au plomb. — Au point de vue de la mesure de la force électromotrice comme de la tension, l'introduction, qui remonte à quelques années seulement, de l'emploi d'électrodes auxiliaires, a permis l'étude séparée de l'anode et de la cathode et a contribué puissamment à accroître nos connaissances sur le fonctionnement de l'accumulateur. On mesure la différence de potentiel entre l'électrode auxiliaire et l'anode, d'une part, et la cathode, d'autre part, et on peut suivre ainsi les variations de force électromotrice ou de tension anodique et cathodique, la force électromotrice, ou la tension aux bornes de l'élément, étant évidemment la différence algébrique des deux valeurs ainsi mesurées. Bien des remarques sont à faire à propos des électrodes auxiliaires, qui doivent réunir un certain nombre de qualités. En outre, dans la discussion des résultats, on doit tenir compte du choix de l'électrode employée et des réactions des couples anode ou cathode, électrode auxiliaire, pendant les mesures. On trouvera des développements complets sur cette question dans le traité précédemment cité.

La force électromotrice de l'accumulateur varie dans d'assez grandes limites avec la concentration de l'acide, ainsi que la théorie permet de le prévoir et ainsi qu'on le constate par expérience. Pour donner une idée de cette variation, voici quelques valeurs observées : 1,89 volt pour $d = 1,044$ (59°, B.) ; 1,96 volt pour $d = 1,116$ (15° B.) ; 2,04 volts pour $d = 1,21$ (25° B.), et 2,23 volts pour $d = 1,383$ (40° B.). Si, en pratique, on ne tire pas profit de cette augmentation, c'est parce que, comme nous le verrons, le fonctionnement de l'élément devient très défectueux avec des électrolytes trop concentrés.

Beaucoup plus faible et négligeable en pratique est la variation de la force électromotrice avec la température. Les mesures de Dolezalek montrent que le coefficient de température est positif pour les densités d'acide supérieures à 1,044 (avec un maximum de 0,38 millivolt par

degré pour $d = 1,125$) et négatif pour les densités d'acide inférieures.

La théorie thermodynamique et la théorie osmotique ont permis de calculer les variations soit de la force électromotrice, soit du potentiel anodique ou cathodique en fonction de la concentration, et ici aussi la double sulfatation s'est trouvée en accord satisfaisant avec l'expérience.

La force électromotrice varie pendant les différents états de charge et de décharge. Cette variation ne provient pas de la modification chimique de la matière, car on a reconnu que la force électromotrice varie très peu avec les proportions croissantes de sulfate de plomb à la positive comme à la négative. Elle doit être imputée surtout aux variations de concentration de l'acide dans les pores de la matière active, concentration plus élevée en charge, plus faible en décharge.

Résistance intérieure de l'accumulateur au plomb. — Nous passerons sous silence les méthodes de mesures récentes, imaginées en assez grand nombre.

La résistance diminue-t-elle lorsque l'intensité croît? C'est ce qu'on admettait assez généralement autrefois; cependant des essais récents, à l'aide d'une méthode de mesure directe de résistance de l'élément à circuit fermé, n'indiquent aucune dépendance de l'intensité. Il est possible pourtant qu'une telle méthode ne soit pas sans objection dans ce cas.

La résistance intérieure varie pendant les différents états de charge et de décharge. Elle augmente pendant la décharge, plus rapidement vers la fin; elle peut ainsi doubler et même tripler ou quadrupler. En charge, elle repasse à peu près par les mêmes valeurs en sens inverse.

Des mesures de Dolezalek et Gahl, il résulte que, à la fin de la charge, la plus grande partie de la résistance intérieure est donnée par l'électrolyte. La résistivité de celui-ci passe par un minimum (1,365 ohm-cm à 18° C. pour la concentration 30 0/0 de H^2SO^4). Pendant la décharge, l'augmentation est due surtout aux électrodes (formation de sulfate, dilution de l'acide dans les pores).

En général, on trouve que la plus grande variation de résistance provient de la positive. Cependant la négative, lorsqu'elle est poussée, donne une augmentation de résistance plus rapide vers la fin.

La résistance varie également avec la température, qui diminue, comme on sait, la résistivité de l'acide sulfurique d'après un coefficient

compris entre 1,45 et 1,70 0/0 par degré pour les densités ordinaires de 1,14 à 1,26.

Différence de potentiel aux bornes de l'accumulateur au plomb. — Connaissant la force électromotrice d'un élément et sa résistance intérieure, on obtient directement la différence de potentiel aux bornes e d'après $e = E \pm rI$, selon que l'élément charge ou décharge. Cependant la difficulté de mesurer la résistance intérieure et la force électromotrice, si instables et si variables, fait qu'en pratique on ne se sert pour ainsi dire jamais des composantes E et r pour la détermination de e que l'on mesure directement. Même dans les cas où les éléments doivent servir dans les batteries-tampon et où une des qualités les plus importantes à distinguer est la faiblesse de la résistance intérieure, la valeur de celle-ci n'est presque jamais donnée, et les qualités de l'élément résultent d'une courbe caractéristique (variation de e en fonction de I) que nous examinerons dans ce chapitre.

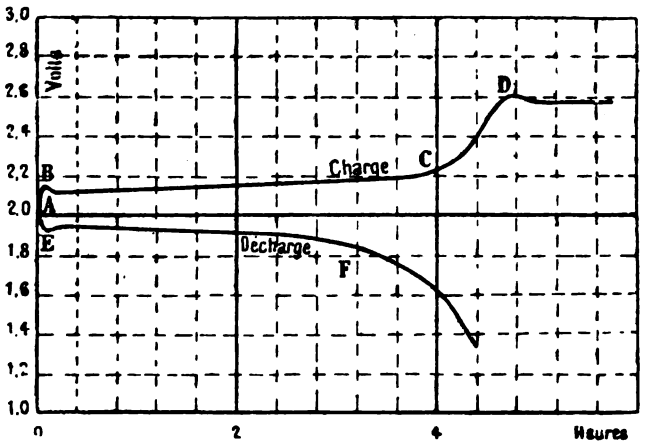


Fig. 1.

La variation de e pendant les différents états de charge et de décharge est donnée par les courbes bien connues de la *fig.* 1. Si je projette ces courbes, c'est pour tenter d'expliquer certaines particularités peu connues. Sur la courbe de décharge, on voit d'abord une baisse rapide AE, qui provient surtout de ce que la formation de sulfate a produit une diminution de concentration de l'acide dans le voisinage immédiat de la matière active. Souvent la courbe passe

par un minimum E, se relève légèrement, puis baisse lentement jusqu'en F par suite de la diminution de force électromotrice et de l'augmentation de la résistance intérieure, dues surtout à la diminution progressive de concentration dans les pores et à la formation du sulfate de plomb. En F se produit le crochet, lorsque la diffusion est incapable d'amener à l'intérieur l'acide nécessaire (les pores se bouchent de plus en plus par suite de la présence du sulfate qui augmente le volume de la matière, et la matière travaille de plus en plus en profondeur). Il survient à la fois une baisse de la force électromotrice et une augmentation de la résistance.

Le minimum E peut être expliqué de différentes façons. D'après Dolezalek, on doit l'attribuer à la formation d'une solution sursaturée de sulfate de plomb. Comme la solubilité du sulfate de plomb diminue avec la dilution, Dolezalek admet que la diminution initiale de concentration provoque une sursaturation du sulfate et, par suite, une augmentation de concentration [1] des ions $\overset{++}{Pb}$, ce qui, d'après l'équation de Liebenow :

$$E = \frac{RT}{2} \log_{nep} \frac{C_p \cdot C_n}{[\overset{++}{Pb}]\,[PbO^{\overset{--}{2}}]},$$

donne lieu à une diminution de force électromotrice.

Parmi les autres explications, citons l'augmentation de température dans les pores, par suite de l'effet Joule et aussi de la chaleur de dilution de l'acide ; cette petite élévation de température provoquant une diminution de résistance intérieure. On a admis aussi (U. Schoop) que l'hydrogène occlus dans la négative créait une diminution initiale de la surface et une formation d'eau, cause de baisse de la force électromotrice. Il faut remarquer cependant que le minimum en question se constate également sur la force électromotrice et aussi sur la tension anodique comme sur la tension cathodique ; il dépend de nombreuses circonstances : intensité de la charge précédente, intervalle entre la charge et la décharge, densité et température de l'acide, intensité du courant de décharge, épaisseur de la matière active. L'explication de Dolezalek est la plus plausible.

En charge, l'augmentation initiale provient de la mise en liberté de H^2SO^4 par suite de la décomposition du sulfate. En B se produit

---

(1) La concentration des ions $\overset{++}{Pb}$ est désignée dans la formule par l'expression $[\overset{++}{Pb}]$.

quelquefois un maximum lorsque la quantité de sulfate formé en décharge a été suffisante pour donner lieu à une valeur élevée de la résistance initiale au début de la charge. La lente montée BC provient de l'augmentation de densité de l'acide dans les pores, d'une pénétration plus profonde des lignes de courant dans la matière et d'une plus grande difficulté d'égalisation entre l'acide intérieur et extérieur. L'augmentation rapide CD peut être expliquée avec Nernst et Dolezalek par une rapide électrolyse du sulfate de plomb dont l'acide s'est saturé pendant la charge. La concentration des ions $\overset{++}{Pb}$ et $\overset{--}{PbO^2}$ diminue alors, ce qui provoque, d'après l'équation de Liebenow, une augmentation de la force électromotrice. Enfin, en D, il n'y a plus suffisamment d'ions $\overset{++}{Pb}$ et $\overset{--}{PbO^2}$, et ce sont les ions $\overset{+}{H}$ et $\overset{--}{SO^4}$ de l'acide que l'on décharge. Quelquefois, après D, on trouve une légère baisse due à l'effet mécanique du dégagement gazeux qui tend à égaliser les concentrations intérieure et extérieure.

La partie finale de la charge demande encore d'autres explications. En comparant en effet les tensions cathodiques et anodiques mesurées par Nernst, de même qu'en examinant les courbes de polarisation anodique et cathodique de l'acide sulfurique, on trouve que, pour séparer SO^4H^2 en ions $\overset{--}{SO^4}$ et $\overset{+}{H}$, il faut $1,9 + 0 = 1,9$ volt. Or la tension cathodique du plomb (par rapport à H) est de $+ 0,17$ volt, c'est-à-dire qu'il faut $1,90 + 0,17 = 2,07$ volts pour séparer SO^4Pb en ses ions $\overset{--}{SO^4}$ et $\overset{++}{Pb}$. Il devrait donc être impossible de séparer le plomb à la cathode (et encore moins le zinc dans l'accumulateur au zinc). Nernst a expliqué cette anomalie par ce fait que le travail nécessaire pour la formation des bulles d'hydrogène à la surface d'un métal augmente d'autant plus que le métal considéré a une faible capacité d'occlusion, ce qui est le cas du plomb. En somme, la production d'hydrogène à la surface d'un métal exige une surélévation de tension variable avec chaque métal.

Dans les *fig.* 2 et 3, nous avons relevé les variations de tension anodique et cathodique avec électrode auxiliaire en plomb, pour des concentrations variables d'acide. Comme on le voit, la capacité était limitée par les positives. Montée entre positives à la plus grande capacité, la négative 5 a donné la courbe pointillée qui montre le crochet. On remarque que les courbes dues aux positives diffèrent beaucoup plus que celles dues aux négatives, parce que, dans le premier cas, on mesure le couple Pb/PbO^2, qui varie avec la concentra-

tion, alors que, dans le second cas, on mesure le couple Pb/Pb, qui en est indépendant. Les différences entre les courbes négatives ne proviennent donc que des différences dans les concentrations des pores et des variations de résistance intérieure. Les courbes de la *fig.* 3 se

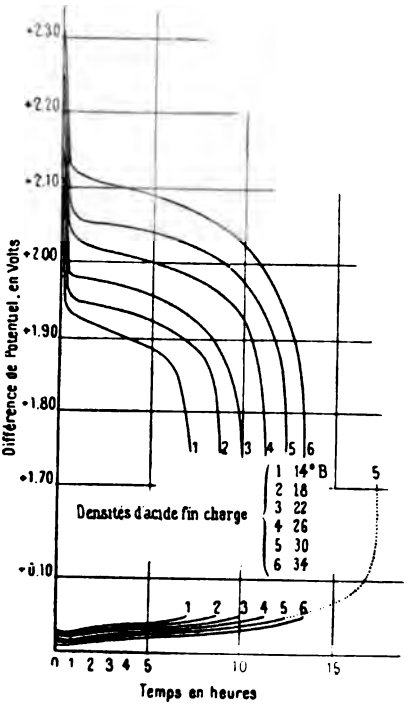


Fig. 2.

rapportent à la charge des mêmes éléments. On voit que la tension anodique finale est d'autant plus élevée que la concentration est plus forte; c'est l'inverse qui a lieu pour la tension cathodique, de sorte que la différence de potentiel finale aux bornes varie très peu avec la concentration. Pour les mêmes raisons qu'en décharge, les courbes des négatives diffèrent peu pendant la première partie. Les valeurs obtenues pour la tension cathodique à la fin de la charge montrent que la surélévation de tension que nécessite le dégagement d'hydrogène est d'autant plus faible que la concentration de l'acide est élevée, de telle sorte que, pour un acide suffisamment concentré, il peut

y avoir décharge immédiate des ions $\overset{+}{H}$, ce qui concorde avec ce fait que le plomb s'attaque davantage par les acides concentrés.

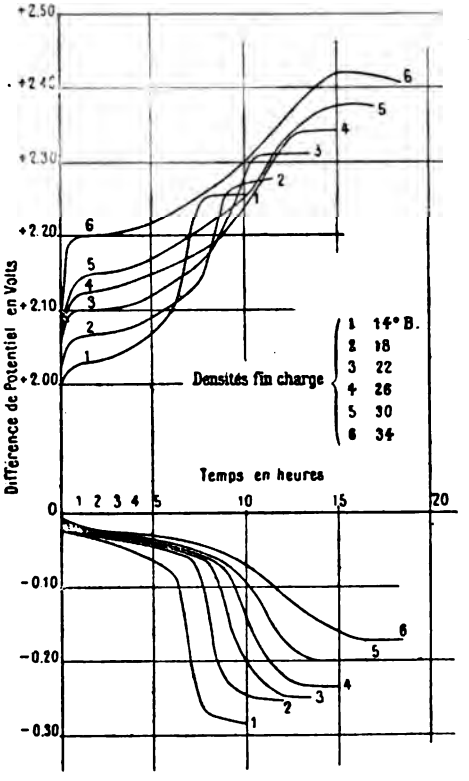


Fig. 3.

La différence de potentiel aux bornes varie avec l'intensité. En pratique, cette variation peut être étudiée à deux points de vue différents. Ou bien on veut connaître la variation de la tension moyenne en fonction de l'intensité pour des décharges complètes, ou bien on veut avoir cette même variation pour des portions très courtes de décharge et de charge. Le premier cas se rapporte à l'utilisation la plus courante des accumulateurs; dans le second cas, c'est le fonctionnement des batteries-tampon que l'on envisage.

La *fig.* 4 montre l'allure des courbes de différence de potentiel moyenne en fonction de l'intensité, ou, ce qui revient au même, du temps

de décharge, la décharge étant complète. Les courbes en traits pleins se rapportent à la tension aux bornes, celles en traits pointillés aux tensions anodiques et cathodiques mesurées avec électrode auxiliaire au plomb. Ces courbes varient un peu avec le type de plaque étudié et surtout avec l'épaisseur de matière active qui travaille.

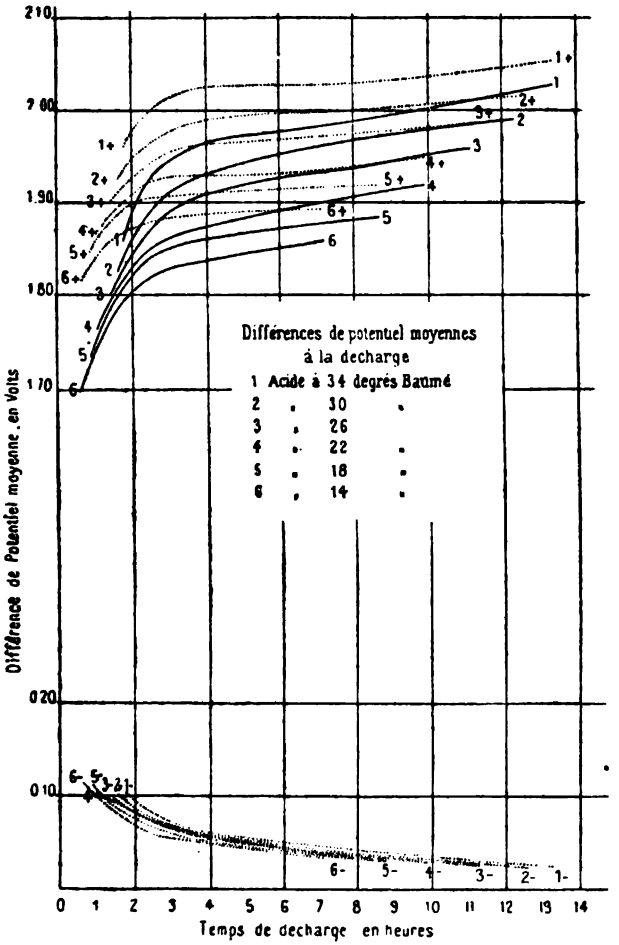


Fig. 4.

On sait que depuis quelques années on emploie beaucoup les batteries d'accumulateurs, dans les stations centrales de tramways

notamment, en les plaçant directement en parallèle avec les machines dans le but de régulariser à la fois la tension du réseau et le débit des génératrices. Le débit du réseau étant très variable, lorsqu'il sera inférieur au débit moyen le courant des génératrices chargera la batterie. Lorsque au contraire le débit du réseau deviendra supérieur au débit moyen des génératrices, la batterie devra débiter en parallèle avec celles-ci. Ce mode de fonctionnement impose aux machines certaines conditions qu'il serait trop long d'examiner ici. On comprend facilement que la condition imposée aux batteries est une tension aussi peu variable que possible avec l'intensité, et cela implique non seulement une faible résistance intérieure, mais encore une force électromotrice aussi peu variable que possible pendant les périodes successives de charge et de décharge. La courbe de variation de la tension aux bornes en fonction de l'intensité peut être

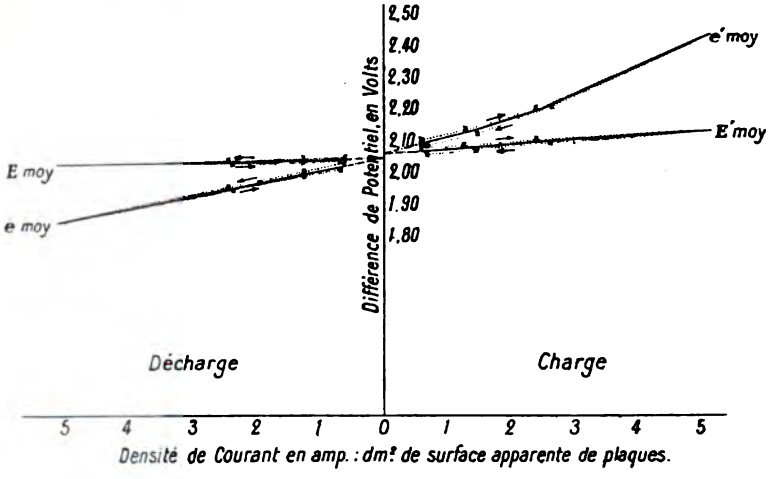


Fig. 5.

appelée caractéristique de l'accumulateur. La *fig.* 5 représente cette courbe. Avec une telle courbe, on doit indiquer évidemment le temps des périodes successives de charge et de décharge. Ici il était de trente secondes. La courbe $e_{moy}e'_{moy}$ se rapporte à la tension aux bornes, et $E_{moy}E'_{moy}$ à la force électromotrice pendant des périodes de trente secondes suivant la charge ou la décharge. Les courbes sont d'autant plus inclinées en effet que les périodes sont longues. Comme

on a affaire à des courbes qui sont presque des droites, on pourrait caractériser l'élément par le coefficient angulaire de la courbe de variation de la tension en fonction de l'intensité, auquel on pourrait donner le nom de résistance moyenne apparente. Dans l'exemple donné ici, on peut conclure que l'élément soumis pendant trente secondes à une différence de potentiel de 2,26 volts chargerait à une densité moyenne de courant de 3 ampères par décimètre carré.

Remarquons ici que ces caractéristiques dépendent de l'état de charge ou de décharge de l'accumulateur. Pour les avoir aussi peu inclinées que possible, il ne faut se placer vers aucune des deux positions fin décharge ou fin charge, qui sont instables.

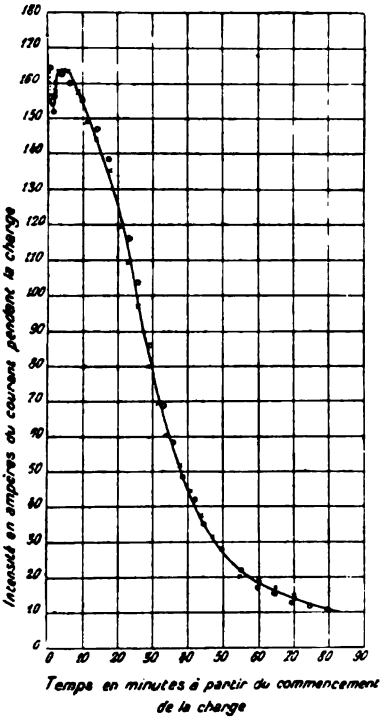


Fig. 6.

Un autre problème qui se rattache indirectement à l'influence de l'intensité sur la différence de potentiel aux bornes est celui de la charge des éléments à potentiel constant. Si on applique aux bornes

d'un élément une tension constante et supérieure à sa force électromotrice, cet élément se chargera à une intensité qui ira évidemment en décroissant suivant une courbe telle que celle indiquée par la *fig.* 6. L'intensité tend vers une constante lorsque l'élément est chargé, puisqu'on a à chaque instant $I = \frac{U - E}{r}$, U étant la tension constante appliquée, et que E et r tendent à des valeurs constantes. On remarque fréquemment au début une chute brusque de l'intensité suivie d'un relèvement. Peut-être faut-il attribuer ce fait à la diminution de résistance au début de la charge, diminution qui peut être accentuée par un dégagement de chaleur dû à l'effet Joule dans les pores de la matière, l'intensité étant très élevée.

A propos de la charge à potentiel constant, disons que c'est le mode de charge le plus rationnel de l'élément. Au point de vue du rendement comme au point de vue de la conservation des plaques, il est préférable au mode de charge à intensité constante si on compare à temps de charge égal. Il permet aussi dans des cas spéciaux de recharger un élément partiellement ou complètement dans un temps court.

Capacité de l'accumulateur au plomb. — Un des facteurs les plus importants à considérer en pratique est celui de la capacité. C'est surtout sur la capacité Q que l'on peut agir pour augmenter l'énergie eQ dont dépendent les applications possibles de l'accumulateur. On sait qu'on appelle capacité totale utilisable celle que l'on obtient jusqu'au crochet de la courbe de décharge (diff. de pot. aux bornes en fonction du temps de décharge). Ce crochet se produit en moyenne à 1,80 volt; mais il varie entre 1,70 et 1,90 volt avec l'intensité de décharge et la concentration de l'acide.

Un premier point à examiner, c'est la façon dont on utilise la matière active. Lorsqu'on est en présence d'une électrode soluble, le zinc par exemple, l'utilisation de la matière est théorique et, aux actions locales près, la capacité de l'électrode est donnée par le chiffre théorique $1^{gr},2$ par ampère-heure, c'est-à-dire qu'une électrode de 1.200 grammes zinc pourra fournir 1.000 ampères-heures. Avec les matières actives insolubles et se modifiant comme celles de l'accumulateur au plomb, il n'en est pas ainsi, et, s'il est vrai qu'un ampère-heure engage, comme l'indique la théorie, $3^{gr},86$ de plomb spongieux et $4^{gr},46$ de peroxyde (toujours aux actions locales près), on ne peut pas dire qu'un poids P de plomb spongieux pourra donner $\frac{P}{3,86}$ ampères-

heures. On peut appeler coefficient d'utilisation de la matière active le rapport entre la capacité que peut donner une électrode et la capacité théorique $\frac{P}{3,86}$ ou $\frac{P}{4,46}$. Je lais e de côté ici l'électrolyte, qui, dans l'accumulateur au plomb, doit être considéré comme une matière active, puisque sa consommation, d'après la double sulfatation, est 3gr,66 H^2SO^4 par ampère-heure; mais, en pratique, les quantités d'acide sulfurique employées sont considérablement plus élevées que les quantités théoriques, et l'électrolyte ne limite pour ainsi dire jamais la capacité.

En pratique, quand une décharge est terminée et qu'on se trouve au crochet de la courbe, on constate que la plus grande partie du peroxyde et du plomb spongieux est restée inutilisée et que l'électrolyte renferme encore un très grand excès d'acide sulfurique. Si la capacité est limitée malgré cette abondance de matières actives, cela tient le plus souvent à ce que l'acide sulfurique, quoiqu'en excès dans le liquide extérieur, est bientôt en défaut à l'intérieur des pores de la matière. En effet, la consommation de H^2SO^4 est sensiblement proportionnelle au nombre d'ampères-heures débités, tandis que la diffusion ou les courants de concentration (que nous verrons plus loin) amènent à l'intérieur une quantité de H^2SO^4 qui va sans cesse en diminuant lorsque les lignes de courant pénètrent plus profondément dans la matière active. La section des pores devient en effet de plus en plus petite par suite de la formation du sulfate.

Dans certains cas cependant (faibles densités de courant, faibles épaisseurs de matière) et surtout pour les négatives, la capacité peut être limitée par la grosseur des cristaux de matière; chaque cristal ne travaillant qu'en surface, plus les cristaux sont gros et plus faible est l'utilisation de la matière active.

Pour ces raisons, le coefficient d'utilisation est toujours très inférieur à 1 en pratique. Des expériences nous ont montré que, pour obtenir le coefficient très élevé 0,6, qu'il ne paraît pas possible de dépasser, il faut se placer dans des conditions exceptionnelles : décharges excessivement lentes, très faible épaisseur, grande porosité de la matière active, etc. En pratique, le coefficient d'utilisation est le plus souvent compris entre 0,1 et 0,35.

En partant du coefficient d'utilisation maximum 0,6, on déduit pour le poids de matières actives par ampère-heure $\frac{3,86 + 4,46}{0,6} = 13^{gr},86$

et pour le poids minimum de plaques $\frac{13,86}{0,65} = 21^{gr},32$ par ampère-heure, le support de la matière entrant au moins pour 35 0/0 dans le poids de la plaque. Le coefficient d'accessoires étant au moins égal à 1,5, le poids d'élément devient 21,32 . 1,5 = 32 grammes par ampère-heure. On en déduit pour l'énergie massique maximum de l'accumulateur au plomb $\frac{2.1000}{32} = 62$ watts-heures par kilogramme d'élément. Les accumulateurs au plomb les plus légers actuellement construits n'atteignent que 30 à 40 watts-heures par kilogramme.

La capacité dépend considérablement de l'intensité de décharge. Cette dépendance, connue depuis très longtemps, se comprend très bien, puisque la consommation de H^2SO^4 pendant l'unité de temps croît proportionnellement à l'intensité, alors que les quantités d'acide diffusé, d'après la loi de Fick, ne peuvent suivre la même loi. On a donné des formules empiriques reliant la capacité à l'intensité. Celle de Peukert se traduit par $I^n \cdot t =$ constante, d'où $C_1 = C \left(\frac{I}{I_1}\right)^{n-1}$, le coefficient n variant de 1,25 à 1,60 environ avec les différents types. D'autres lois ont été proposées; citons notamment celle de Dolezalek, $C = \frac{B}{A + I}$ (A et B étant des constantes), déterminée en appliquant la loi de Fick. Mais toutes ces formules ne servent guère en pratique, car elles ne sont que très approchées. On s'en rapporte bien plutôt aux courbes de variation de la capacité en fonction de l'intensité déterminées par expériences. On trouve que les plaques à grande surface donnent une capacité plus constante en fonction de l'intensité que les plaques à grande épaisseur de matière. En général, la capacité des négatives baisse plus vite que celle des positives.

La capacité dépend de l'épaisseur de la matière active qui travaille. Ici aussi on peut donner des formules empiriques plus ou moins approchées; mais ce n'est encore qu'à l'expérience qu'on peut s'en rapporter. Les *fig.* 7 et 8 représentent des courbes que nous avons tracées à cet effet, la première relative à des plaques positives, et la deuxième à des plaques négatives. Toutes ces plaques, du type à grille, étaient en tous points semblables, et ne différaient que par l'épaisseur de la matière active. Comme les épaisseurs portées sont celles des plaques elles-mêmes, l'épaisseur sous laquelle la matière

active travaille est évidemment la moitié de cette valeur. Pour les positives, dans les limites de nos essais, les courbes sont sensiblement des droites dont le coefficient angulaire diminue lorsqu'on fait croître l'intensité du courant. Plus l'intensité est élevée et moins on

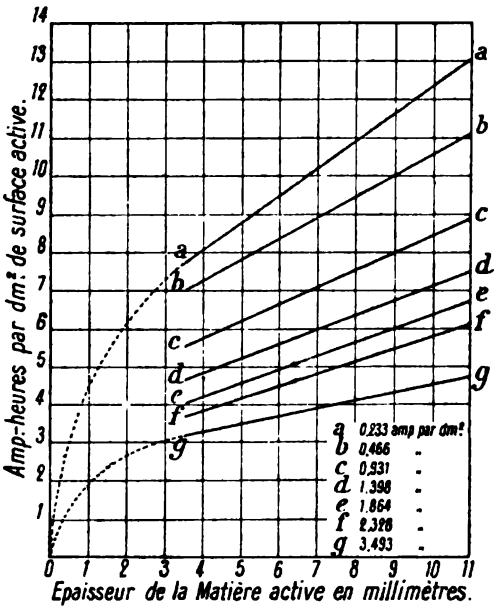


Fig. 7.

gagne au point de vue de la capacité à prendre des épaisseurs croissantes de matière active. Ceci se comprend très bien, puisque c'est dans le cas des décharges lentes que la diffusion joue le plus grand rôle; l'augmentation de capacité en fonction de l'épaisseur doit donc être plus rapide dans le cas des décharges lentes que dans celui des décharges à haute intensité. Pour les négatives correspondantes, les capacités croissent plus rapidement que celles des positives aux régimes faibles et plus lentement aux régimes élevés.

La porosité de la matière active exerce une très grosse influence sur la capacité. C'est d'elle en effet que dépend la section plus ou moins grande offerte par les pores, et, par suite, la diffusion plus ou moins active et le coefficient d'utilisation plus ou moins grand. Examinons les conditions à réaliser pour obtenir la plus grande porosité

possible. On peut appeler densité apparente de la matière active le rapport de la masse de Pb ou PbO^2 au volume total occupé. La porosité peut alors être exprimée par le rapport entre la densité réelle et la densité apparente. La densité apparente du plomb spongieux ou

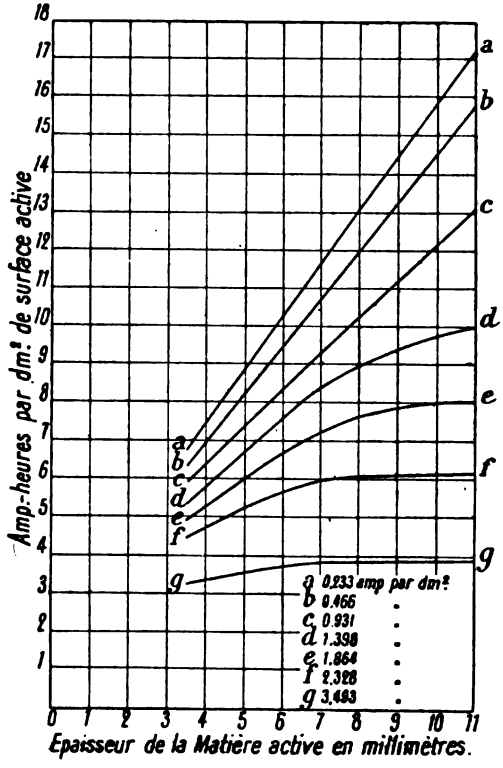


Fig. 8.

du peroxyde doit dépendre évidemment : 1° de la densité apparente du sel ou de l'oxyde de plomb employé pour l'empâtage; 2° du rapport entre le poids moléculaire du plomb ou du peroxyde et celui du sel ou de l'oxyde employé; 3° de l'addition de substances étrangères solubles ou volatiles. On connaît les densités réelles des principaux composés du plomb employés :

Plomb métallique.	11,4
Minium	8,9
Litharge.	9,3
Peroxyde.	9,4
Sulfate de plomb.	6,2
Chlorure de plomb fondu . . .	5,7

Pour les substances pulvérisées, comme le minium ou la litharge, qui sont le plus fréquemment employées, la densité apparente obtenue en tassant à la main est beaucoup plus faible que la densité réelle; elle est en général comprise entre 4 et 4,5, mais elle varie avec le degré de pulvérisation, et peut être inférieure à 4. La matière active sera évidemment d'autant plus poreuse que la substance employée aura une densité apparente moindre. L'influence du poids moléculaire de la substance initiale résulte du tableau suivant :

Substances	Formules	Masses moléculaires	Rapport des masses moléculaires pour 1 Pb
Plomb métallique. . .	Pb	207	1,00
Minium	Pb^3O^4	3.228	1,10
Litharge	PbO	223	1,08
Peroxyde	PbO^2	239	1,15
Sulfate de plomb. . .	$PbSO^4$	303	1,46
Chlorure de plomb. .	$PbCl^2$	278	1,34

On peut conclure que c'est le sulfate qui donne la plus grande porosité, puis le chlorure et les oxydes dans l'ordre décroissant d'oxydation. Dans les empâtages d'oxydes et d'acide sulfurique, on aura donc intérêt, au point de vue de la capacité, à partir d'un oxyde aussi élevé que possible, et à former le plus possible de sulfate de plomb. Nous avons reconnu d'ailleurs par des expériences la validité des lois qui viennent d'être indiquées.

La capacité est dépendante de l'état moléculaire de la matière active. A notre connaissance, personne n'a encore signalé ce phénomène qui s'exerce surtout à la négative, peut-être parce que la concentration des ions $\overset{++}{Pb}$ est beaucoup plus grande et peut varier dans de bien plus grandes limites que celle des ions $\overline{PbO^2}$. Il est extrêmement remarquable qu'une négative, par exemple, fabriquée dans les mêmes conditions, et ayant par conséquent même densité apparente de matière, donne des capacités très différentes selon les conditions dans lesquelles on aura opéré la réduction. Cela tient aux différences d'état moléculaire du plomb, et très certainement à la grosseur variable des cristaux de plomb spongieux. Prenons, par exemple,

des plaques exactement semblables et garnies de chlorure de plomb, dont l'insolubilité dans l'eau est bien moindre, comme on sait, que celle du sulfate. En réduisant ces plaques par le zinc, en constituant un couple, on aura des cristaux d'autant plus gros que, pour la même concentration de l'électrolyte, l'intensité de réduction sera faible, et la capacité que donnera ensuite la plaque sera d'autant plus faible qu'aura été petite l'intensité de réduction. C'est ce que montrent nettement les courbes de la *fig.* 9. Avec le sulfate de plomb lui-même, il est possible de créer par des différences de solubilité des grosseurs

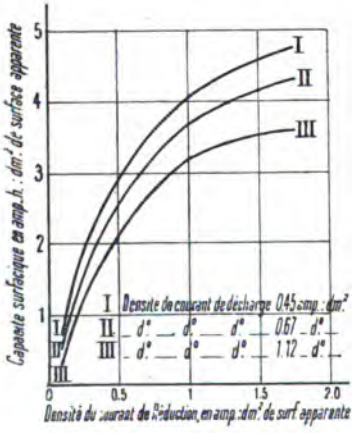


Fig. 9.

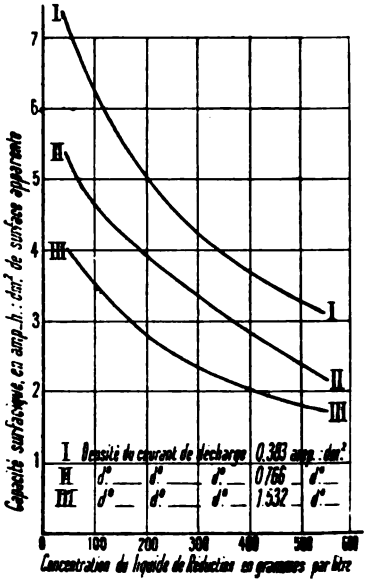


Fig. 10.

variables des cristaux et des capacités variables. Les courbes de la *fig.* 10 se rapportent à des plaques dont l'empâtage était à base d'oxydes et de sulfate et pour lesquelles on a opéré la réduction à la même intensité, mais dans un sulfate alcalin de concentration variable, le sulfate de plomb envoyant en solution dans ce sulfate alcalin plus d'ions $\overset{++}{Pb}$ que dans l'acide sulfurique.

La concentration de l'acide sulfurique a sur la capacité une influence connue depuis longtemps, mais qui n'a été précisée que dans ces dernières années. Dolezalek avait admis que le maximum

de capacité doit correspondre au maximum de conductibilité de l'acide. On peut supposer en effet que les lignes de courant pénètrent peu à peu dans l'intérieur de la matière, de telle façon que la baisse de force électromotrice des couches extérieures correspond à la perte en volts rI dans les pores. Pour une même baisse de tension, les lignes de courant auront donc pénétré d'autant plus profondément, c'est-à-dire la capacité sera d'autant plus grande, que la résistivité de l'acide sera faible dans les pores. En pratique, on constate, comme nous l'avons déterminé dans les courbes de la

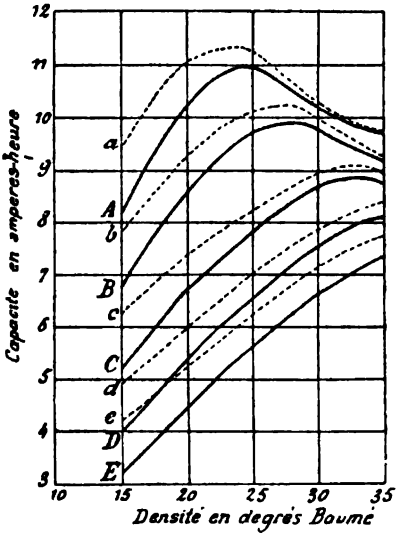


Fig. 11.

fig. 11, que la concentration qui procure le maximum de capacité varie avec l'intensité de décharge. Ces courbes se rapportent à des plaques de 10 centimètres de côté déchargées aux intensités $0^{amp},5$ (courbes A*a*), $0^{amp},75$ (B*b*), $1^{amp},25$ (C*c*), 2 ampères (D*d*) et 3 ampères (E*e*). Les courbes en traits pleins indiquent les capacités jusque 1,80 volt ; celles en traits pointillés, les capacités jusque 1,70 volt. Plus l'intensité est grande, plus le maximum se recule vers les fortes concentrations d'acide.

Si on détermine, comme nous l'avons fait dans les *fig.* 12 et 13, les mêmes courbes relatives, les premières aux positives, les secondes

aux négatives, on trouve que, pour les mêmes intensités $0^{amp},5$ (A), 1 ampère (B), 2 ampères (C), 4 ampères (D), les maxima se produisent toujours à des concentrations plus faibles pour les négatives que pour les positives. Ces phénomènes peuvent s'accorder avec l'explication donnée plus haut, si on envisage les conditions de résistivité minimum, non de l'acide extérieur, mais de l'acide des pores. A la positive, la densité moyenne 1,2 dans les pores pourra n'être pas dépassée, même en adoptant des concentrations extérieures

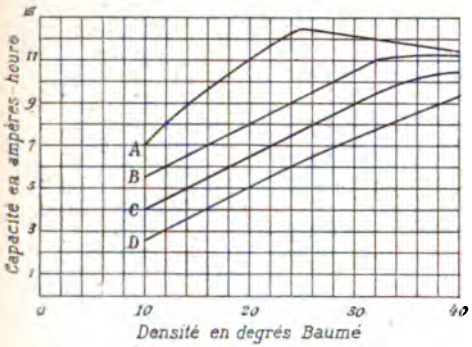


Fig. 12.

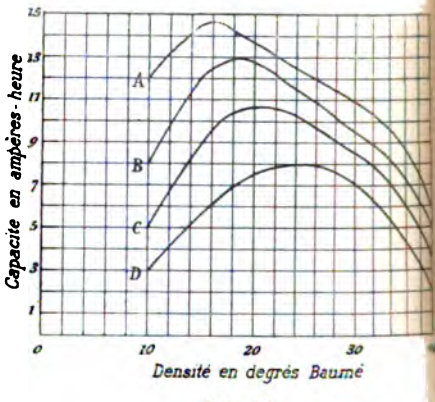


Fig. 13.

très élevées, si l'intensité est suffisante pour faire disparaître plus d'acide que n'en amène la diffusion. Si, à la négative, les concentrations procurant le maximum de capacité sont inférieures à celles des positives, c'est que la concentration dans les pores s'enrichit non seulement de l'acide diffusé, mais encore de l'électrolyse des ions SO^4 vers la négative pendant la décharge.

Les états antérieurs ont sur la capacité une influence que nous avons mise en lumière en 1898. Lorsqu'on décharge un élément dans les mêmes conditions de concentration et d'intensité, on trouve une capacité variable avec la décharge précédente. En traçant les courbes de capacité pour un cycle complet d'intensités, on trouve l'allure *abcde* de la *fig.* 14. Il se produit un véritable phénomène d'hystérésis qui peut très bien s'expliquer de la façon suivante : après une décharge lente, la quantité d'acide libéré dans les pores de la matière est plus grande qu'après une décharge rapide. Comme la diffusion ne se fait qu'imparfaitement, la matière disposera pendant

la décharge après le premier cas d'une quantité d'acide supérieure à celle disponible après la décharge rapide.

Remarquons ici que tout ce que nous avons dit de la diffusion peut être attribué aussi aux courants de concentration signalés par Dolezalck et qui ont les mêmes effets que la diffusion. Les matières

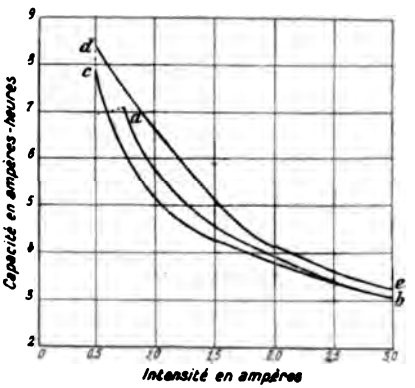


Fig. 14.

actives, étant imprégnées intérieurement et extérieurement de solutions d'acide de concentration différente, peuvent être assimilées à deux éléments de concentration inégale placés en opposition, la matière active formant le conducteur qui les relie. Celui de concentration plus forte ayant une force électromotrice supérieure va se décharger, tandis que l'autre se chargera, de sorte que les concentrations tendront à s'égaliser comme sous l'influence de la diffusion.

La température a une influence très notable sur la capacité, qu'elle fait croître. Là encore il faut voir une action de la diffusion, la quantité d'acide sulfurique diffusé augmentant, toutes choses égales d'ailleurs, de 2,4 0/0 par degré C., ou encore une action des courants de concentration, la résistivité de l'acide diminuant de 1,36 à 1,78 0/0 par degré entre les densités d'acide 1,10 et 1,30. Le coefficient de température de l'accumulateur, augmentation de la capacité par degré C., dépend surtout du type de plaque et de l'intensité de décharge. C. Liagre a trouvé un coefficient variant de 0,5 à 4,5 0/0 pour des plaques à grande surface. Nous avons trouvé des valeurs différentes pour des plaques empâtées. Les courbes de la *fig.* 15 et celles de la *fig.* 16 indiquent respectivement les variations de capacité avec la température pour des

positives (*fig.* 15) et pour des négatives (*fig.* 16) à grille mince empâtée. Pour les premières, le coefficient, entre 20 et 40° C., est, dans l'ordre des intensités croissantes indiquées, 0,56 0/0, 0,75 0/0, 1,06 0/0 et 0,96 0/0. Pour les négatives, on trouve la variation plus rapide 0,1 0/0, 1,02 0/0, 1,65 0/0 et 2,27 0/0. La diffusion insuffisante limitant d'autant plus la capacité que l'intensité de décharge est élevée, on comprend très bien l'influence plus considérable de la

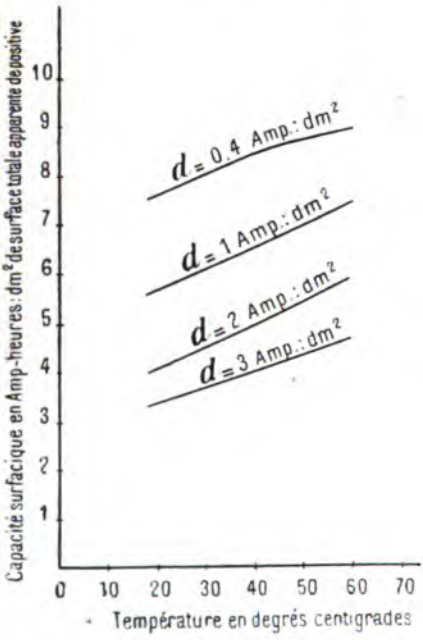


Fig. 15.

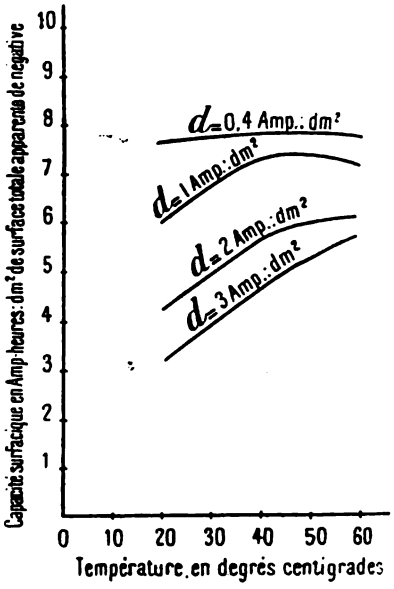


Fig. 16.

température aux régimes élevés. Dans les deux courbes, on constate que, pour les régimes très lents, la courbe s'incurve vers l'axe des X, parce que, pour ces régimes lents, la capacité ne peut monter indéfiniment, elle tend vers une limite déterminée par la quantité de matière active. Sur les courbes de la *fig.* 16, on constate même que, pour les régimes lents, la capacité diminue à partir d'une certaine température. Nous avons reconnu que ce fait est imputable à l'augmentation des actions locales, très importante aux négatives. Les courbes de décharge des positives données en *fig.* 17 sont très intéressantes à examiner. Elles se rapportent à la densité de courant

0,775 ampère par décimètre carré et montrent nettement l'influence de la température sur la diffusion. La courbe débute à une valeur

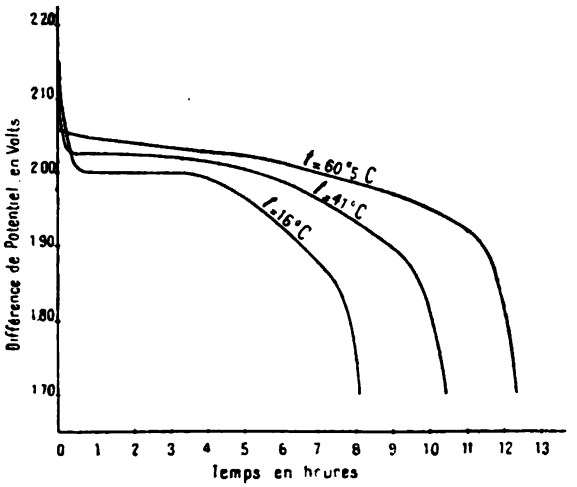


Fig. 17.

d'autant plus faible et se maintient ensuite à une valeur d'autant plus élevée que la température est élevée, celle-ci agissant à la fois sur la

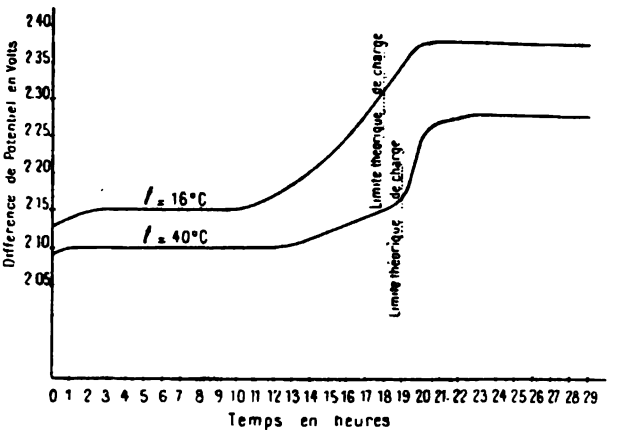


Fig. 18.

résistance intérieure, qu'elle diminue, et sur la force électromotrice, qu'elle tend à maintenir plus élevée (par suite de la diffusion). Les

courbes de la *fig.* 18 se rapportent à la charge à des températures différentes de deux positives déchargées dans les mêmes conditions. Pour les mêmes raisons que ci-dessus, la courbe relative à la température de 40° se place sous celle à 16°. Dans ces deux dernières figures, les tensions indiquées sont les tensions anodiques.

Le chauffage des éléments en vue de l'augmentation de capacité n'est pas appliqué en pratique, à cause surtout de l'influence néfaste sur les négatives au point de vue des actions locales et de la durée.

Une augmentation légère de la température peut être avantageusement employée dans les batteries-tampons pour diminuer le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ entre les tensions moyennes en décharge et en charge.

Durée des plaques de l'accumulateur au plomb. — Au point de vue économique, il est très intéressant d'examiner la durée des plaques. Celle-ci dépend non seulement de la dégradation possible, mais encore de la baisse de capacité. Si on étudie les positives à ce point de vue, on peut les ranger en trois grandes classes :

1° Plaques à grande surface ou plaques genre Planté, caractérisées par un support en plomb doux, capable par conséquent de se peroxyder peu à peu, ce support étant très développé et recouvert par un procédé de formation quelconque d'une couche excessivement mince de peroxyde, qui travaille ainsi sous une très faible épaisseur (souvent inférieure au $\frac{1}{10}$ de millimètre) ;

2° Plaques empâtées, ou plaques genre Faure, caractérisées par un support en alliage inoxydable (généralement plomb antimonieux) présentant des alvéoles de forme quelconque que l'on remplit de matière active, travaillant ainsi sous une épaisseur qui peut être assez élevée et atteint toujours plusieurs millimètres ;

3° Plaques mixtes, ou plaques genre Faure-Planté, caractérisées par un support en plomb doux, par conséquent peroxydable, présentant des alvéoles que l'on garnit de matière active, qui travaille sous forte épaisseur, comme les précédentes, au début.

Si on prend une plaque à grande surface qui a été peu formée au début, on trouve que sa capacité croît avec le nombre de décharges jusqu'à ce que la couche de peroxyde obtenu ait atteint une épaisseur suffisante pour s'opposer à la peroxydation plus profonde. A partir de ce moment, celle-ci ne se fait plus qu'au fur et à mesure de la chute du peroxyde. La capacité ne subit plus que des fluctua-

tions qui dépendent des conditions de fonctionnement; selon que celles-ci sont favorables à une formation plus profonde ou à une chute plus active de matière, la capacité augmente ou diminue. Cependant, en général, cette capacité reste au-dessous de 1 ampère-heure par décimètre carré. Ces phénomènes se produisent jusqu'à ce que le support en plomb doux ne renferme plus suffisamment de métal pour assurer la solidité mécanique et la conductibilité électrique; la plaque est alors usée. Si la plaque a été trop profondément formée au début, la capacité peut baisser au début comme dans le cas des plaques empâtées.

En général, avec les positives empâtées, la capacité est maximum au début du fonctionnement. Elle baisse avec le nombre de décharges par suite de la chute de matière active que rien ne vient compenser. Dans bien des cas, cependant, lorsque la matière active n'a au début qu'une porosité insuffisante, la capacité commence par croître pour passer par un maximum d'où elle descend, comme nous venons de le voir.

Les plaques mixtes travaillent comme les précédentes au début; mais, lorsque la matière active tombe, la capacité, au lieu de baisser comme dans le cas précédent, peut rester constante ou même augmenter, par suite de la peroxydation progressive du support en plomb doux. La capacité restera constante ou augmentera selon le développement plus ou moins grand du support.

C'est donc la chute de matière active qui, dans tous les cas, limite la durée des positives. Ce phénomène, qui paraît inévitable, et que l'emploi d'enveloppes poreuses ne peut que retarder, provient en partie du foisonnement. On appelle ainsi l'augmentation de volume que subit la matière active pendant son fonctionnement. Si on se rappelle que la densité du sulfate de plomb est 6,2, celle du peroxyde 9,4, une molécule de peroxyde occupant un volume 1 au début de la charge occupera, après sulfatation à la fin de la décharge, $\frac{303 \,.\, 9,4}{239 \,.\, 6,2} = 1,925$. Si on suppose un coefficient d'utilisation de 0,5, l'augmentation du volume total de matière pendant la décharge se fera dans le rapport $0,5 + 0,5 \,.\, 1,925 = 1,46$, qu'on peut appeler le coefficient de foisonnement cubique. Si la densité apparente du peroxyde est supérieure à $\frac{9,4}{1,46}$, il y aura augmentation du volume apparent de la matière et la plaque se déformera sous l'influence de

la pression ainsi exercée. Dans tous les cas, d'ailleurs, une modification importante au point de vue physique se sera produite d'une charge à la suivante. On peut considérer en effet le peroxyde initial comme constitué d'une série de cristaux d'une certaine grosseur séparés par des pores ; après une décharge, la partie superficielle de ces cristaux sera sulfatée et aura, par suite, augmenté de volume. Lors de la charge suivante, ce sulfate va régénérer du peroxyde, mais non plus sous la forme du cristal unique qui lui a donné naissance. Ce cristal primitif aura diminué de volume et sera recouvert d'une série de cristaux plus petits séparés entre eux par des pores.

La matière positive se transforme peu à peu en cristaux de plus en plus petits et de plus en plus nombreux, de sorte que l'adhérence de cette matière devient de plus en plus précaire, et les bulles d'oxygène formées à la fin de la charge détachent facilement les fines particules de matière qui tombent au fond du bac.

Si on calcule comme précédemment le foisonnement en partant du plomb métallique du support, on trouve pour un volume 1 de plomb un volume 2,045 de matière à la fin de la décharge.

On comprend que dans ces conditions le foisonnement exerce sur le support des efforts puissants et répétés et qui ont d'autant plus d'action que la ténacité du plomb doux est faible et que les nervures actives ont acquis une faible section. C'est la raison des déformations (allongement et gondolement des plaques en plomb doux).

Indépendamment de certaines influences (forme du quadrillage, composition de l'empâtage, densité de courant, impuretés de l'électrolyte, concentration de l'acide, température), influences que nous avons pu étudier, on peut dire que la durée d'une positive est d'autant plus grande que l'épaisseur de matière active est plus forte s'il s'agit de plaques empâtées, et que les nervures actives en plomb doux sont plus épaisses s'il s'agit de plaques à grande surface. Comme dans le premier cas, la matière est d'autant mieux utilisée qu'elle travaille sous plus faible épaisseur et que, dans le second cas, la capacité dépend, pour une même formation, uniquement de la surface des nervures actives et non de l'épaisseur du plomb; il en résulte que la durée ne peut être augmentée qu aux dépens de la capacité spécifique.

C'est d'ailleurs là une loi générale, tout facteur agissant dans un sens sur la capacité spécifique agit en sens inverse sur la durée.

En pratique, la durée des positives oscille entre une centaine de

décharges complètes pour les plaques empâtées à très grande capacité spécifique (20 à 25 ampères-heures par kilogramme d'électrodes) servant pour les automobiles et un millier de décharges complètes pour les plaques à grande surface ou les plaques mixtes qui servent dans les installations à poste fixe et n'ont pas plus de 5 à 10 ampères-heures par kilogramme d'électrodes. Ces durées sont d'ailleurs très variables avec les conditions d'exploitation, et on peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées que celles qui viennent d'être indiquées si les décharges ne sont que partielles.

Les plaques négatives se comportent tout différemment des positives au point de vue de la durée. D'une façon générale ces plaques baissent de capacité en fonction du nombre de décharges plus rapidement au début, plus lentement ensuite. Certaines négatives, cependant, telles que celles en plomb provenant du chlorure par exemple, ont une capacité presque constante et quelquefois même augmentant au début du fonctionnement. En même temps que la capacité baisse dans les négatives, on constate non pas une chute de matière (du moins en général), mais une contraction de cette matière.

Il est probable que, dans les charges successives, les ions $\overset{++}{Pb}$ se déchargent à la négative en donnant des cristaux très petits de plomb qui viennent peu à peu boucher les pores en certaines parties et donnent finalement une matière de plus grande densité apparente, tandis qu'en d'autres parties il se forme des crevasses. Ce phénomène peut être évité ou très atténué par un état moléculaire spécial du plomb au début.

La durée des négatives dépend des régimes de décharge et de charge, de la concentration de l'acide, de l'épaisseur de la matière active, de l'état de pureté de l'acide, de la température, etc.

En pratique, la durée des négatives est toujours très grande (quelquefois plus de dix ans dans les plaques à poste fixe) lorsqu'on les fait fonctionner jusqu'à leur dégradation en consentant à une diminution de capacité. Pour les négatives très légères, la durée peut être inférieure à un an, si une baisse trop sensible de capacité n'est pas permise.

Actions locales de l'accumulateur au plomb. — On sait qu'on appelle ainsi les actions chimiques qui s'accomplissent à l'intérieur d'un élément sans donner lieu à de l'énergie utilisable.

Parmi ces actions il y a à considérer l'attaque directe du plomb spongieux par l'acide sulfurique, attaque d'autant plus importante

que la concentration de l'acide est élevée, comme l'indiquent les courbes de la *fig.* 19, dans lesquelles on a suivi la sulfatation de deux mêmes plaques négatives en plomb spongieux pur plongées dans des solutions sulfuriques pures de densité 1,32 (courbe 1) et 1,19 (courbe 2). Cette sulfatation croît très rapidement lorsqu'on élève la température.

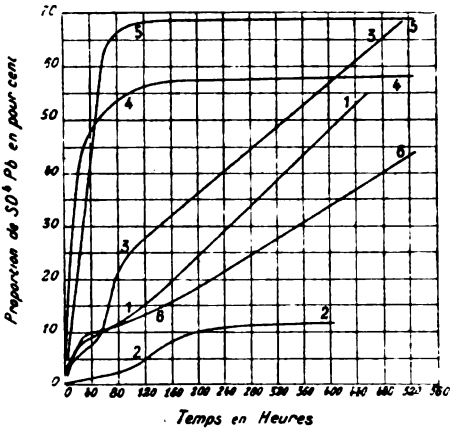


Fig. 19.

Les actions chimiques directes à la positive sont très faibles ; dans les cas où il se produit des traces de corps suroxygénés, eau oxygénée ou acide persulfurique, une petite quantité de peroxyde peut être ramenée à l'état d'oxyde inférieur sulfaté ensuite.

A côté de ces actions, il y a à considérer les actions électrochimiques. Celles-ci se produisent entre le support et la matière active, qui, n'étant pas semblables, donnent lieu à des couples. A la négative, ces actions sont très faibles, puisque entre le plomb spongieux et les alliages de plomb du support n'existe qu'une force électromotrice très faible. Il n'en est pas ainsi à la positive, où le peroxyde est en contact avec le plomb doux ou les alliages de plomb et où par conséquent le couple parasite a une force électromotrice égale à celle de l'accumulateur. C'est pour cette raison qu'une positive à grande surface peu formée perd très rapidement sa capacité. Lorsque l'épaisseur de matière active augmente, l'action de ce couple devient de plus en plus faible. Elle est plus faible encore dans les plaques empâtées lorsque le quadrillage s'est peroxydé superficiel-

lement par suite de la surface de contact plus faible entre la matière active et son support. Ces actions électrochimiques dépendent évidemment de la concentration de l'acide, de la température, du type de plaques, etc.

Les actions locales les plus importantes sont certainement celles qui sont dues aux impuretés que l'on peut rencontrer dans les différentes substances qui constituent l'élément et notamment dans l'acide. Il y a deux façons de mesurer les actions locales ainsi produites : la première consiste à déterminer les proportions de matière active qui entrent en action chimique lorsque l'élément reste au repos ; la deuxième, la plus pratique, consiste à déterminer le rapport entre la capacité que possède encore l'élément après un repos déterminé et sa capacité lorsque la décharge suit immédiatement la charge.

En opérant ainsi avec des plaques empâtées fonctionnant dans un acide de densité 1,25 (29° B.), valeur parmi les plus élevées de celles employées, nous avons trouvé qu'avec le degré de pureté ordinaire de l'acide les pertes à circuit ouvert de la positive sont très faibles ; ainsi, en trente-cinq jours, avec un acide ordinaire renfermant comme impuretés en grammes par litre 0,05 Fe, 0,072 HCl, 0,01 As, 0,075 Az^2O^5, la perte de capacité n'était que de 3 0/0, exactement comme avec un acide chimiquement pur. A la négative, les pertes étaient plus considérables et, avec ce même acide ordinaire, la capacité avait baissé de 18 0/0 en vingt jours, tandis que l'acide chimiquement pur avait procuré une baisse de 10 0/0. Mais, lorsque les impuretés s'accroissent dans des proportions anormales, la perte de capacité à la positive comme à la négative peut devenir plus importante.

L'acide nitrique n'a pas d'influence sensible sur le peroxyde, mais il attaque le plomb spongieux de la négative, qui, en présence de l'acide sulfurique, donne du sulfate de plomb avec régénération de l'acide nitrique. L'acide chlorhydrique agit de la même façon sur la négative ; en outre, il attaque le peroxyde de la positive avec dégagement de chlore et régénération d'une partie de l'acide chlorhydrique du chlorure de plomb qui se transforme en sulfate. Ces deux impuretés tendent d'ailleurs à s'éliminer peu à peu par électrolyse, l'acide nitrique en bioxyde d'azote au pôle négatif et l'acide chlorhydrique sous forme de chlore au pôle positif, jusqu'à n'exister plus qu'à l'état de traces. L'arsenic, dont le rôle est moins important, s'élimine aussi en partie. Seul le fer est fixe, et son action néfaste est due aux deux degrés d'oxydation qu'il prend successivement au contact des deux

électrodes d'après les réactions :

$$2FeSO^4 + PbO^2 + 2H^2SO^4 = Fe^2(SO^4)^3 + PbSO^4 + 2H^2O$$

et

$$Fe^2(SO^4)^3 + Pb = 2FeSO^4 + PbSO^4.$$

La diffusion du sulfate ferreux ou ferrique opère donc un véritable transport d'oxygène de la positive à la négative avec sulfatation aux deux pôles.

Pratiquement, il faut retenir que, pour assurer le mieux possible ce qu'on appelle la conservation de la charge, il faut prendre un acide aussi pur que possible et une concentration aussi faible que peut le permettre la capacité exigée.

Rendement de l'accumulateur au plomb. — Il y a lieu de distinguer deux rendements : le rendement en quantité ou en ampères-heures, rapport entre la quantité d'électricité débitée et la quantité chargée, et le rendement en énergie ou en watts-heures, rapport entre l'énergie fournie à la décharge et l'énergie absorbée à la charge.

Dans les meilleures conditions, le rendement en quantité peut atteindre 0,90 à 0,95. La perte provient de deux causes principales : 1° le dégagement gazeux inévitable à la fin de la charge et qui représente une perte en ampères-heures proportionnelle à la masse des gaz H et O électrolysés ; 2° les actions locales qui se produisent pendant toutes les périodes de fonctionnement (charge, décharge, repos) et correspondent à une perte de quantité d'électricité.

Ces deux causes expliquent clairement que le rendement en quantité dépende de l'intensité du courant de charge, de la densité de l'acide et de la pureté des matières. Un rendement de 0,90 à 0,95 ne peut être obtenu qu'à condition d'employer des substances pures, une concentration d'acide ne dépassant pas 25° B. ($d = 1,21$) et une densité de courant ne dépassant pas environ 0,5 ampère par décimètre carré de surface apparente de plaque.

En pratique on ne doit pas compter sur un rendement aussi élevé. Une bonne batterie ne donne guère qu'un rendement de 0,80 à 0,90; c'est qu'il faut compter avec l'intensité de charge qui est quelquefois assez élevée, avec les impuretés inévitables introduites dans l'acide, avec les intervalles de repos plus ou moins prolongés. Encore faut-il, pour obtenir ce rendement, que la batterie soit en bon état et qu'il n'y ait pas d'éléments en court-circuit.

Le rendement en quantité dépend beaucoup de la température

qui agit sur les actions locales, surtout à la négative. Dans des expériences que nous avons faites, pour un rendement de 0,85 à la température de 18° C. on n'avait que 0,80 à 42° C. et 0,69 à 61° C., toutes autres conditions restant semblables et la température de décharge seule étant variable.

Le rendement en énergie η peut se traduire facilement en fonction du rendement en quantité ρ par l'expression $\eta = \rho \frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$. en désignant par e_{moy} l'expression $\frac{1}{t}\int_0 edt$ se rapportant à la décharge et par e'_{moy} la valeur correspondante en charge. Ces expressions s'obtiennent aisément en intégrant les courbes de charge et de décharge (e en fonction de t) et en divisant par le temps de charge ou de décharge.

Connaissant ρ, il suffit d'examiner le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ pour en déduire η. Le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ baisse lorsque l'intensité croît. Cela est évident, puisqu'on a à tout instant $e = E - rI$ en décharge et $e' = E' + rI$ en charge. L'intensité n'agit d'ailleurs pas seulement sur le terme rI, mais encore sur le terme E, et, à cause des différences de concentration dans les pores de la matière active E, est d'autant plus faible à la décharge et plus élevé à la charge que le temps de ces opérations est moindre, c'est-à-dire que l'intensité est élevée.

En pratique, il y a deux cas particuliers à examiner, selon que l'élément subit des décharges et charges complètes (cas général) ou qu'il subit des décharges et charges partielles (cas des batteries-tampons).

Dans des expériences que nous avons faites dans des conditions variables de concentration d'acide et d'intensité de décharge, nous avons trouvé pour $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ correspondant à des décharges et charges complètes des valeurs montant de 0,861 à 0,871 pour les concentrations allant de 14 à 34° B., dans le cas d'une densité de courant de décharge de 0,5 ampère par décimètre carré de surface apparente. Avec les densités de courant croissantes, ces valeurs diminuaient ; ainsi, en prenant 2,5 ampères par décimètre carré, $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ montait de 0,774 à 0,800 entre 14 et 34° B.

On peut en conclure que, dans les limites de concentration employées

ordinairement, pour un même rendement en quantité, le rendement en énergie augmente avec la concentration. Avec un rendement de 0,90 en quantité, on a pour le rendement en énergie, d'après les chiffres ci-dessus, 0,775 à 0,784 pour la faible densité de courant et 0,697 à 0,721 pour la densité de courant élevée. Ces rendements doivent être considérés comme les plus élevés que l'on puisse obtenir en pratique.

Dans les batteries-tampons, l'étude du rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ pour les décharges et charges partielles successives est doublement utile, puisque plus ce rapport se rapprochera de l'unité et plus le réglage sera parfait, d'une part, et plus le rendement en énergie sera élevé, d'autre part.

Si on détermine ce rapport aux différents points de la décharge et de la charge, on le trouve variable et beaucoup plus faible au début et à la fin de ces opérations. C'est vers le tiers de chacune d'elles qu'on obtient la valeur la plus élevée ; c'est donc en ce point que l'élément aura le meilleur fonctionnement.

En étudiant d'autre part l'influence de l'intensité du courant, nous avons trouvé pour des périodes successives de charge et de décharge de trente secondes de durée : $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}} = 0,971$ pour la densité de courant 0,5 ampère par décimètre carré de surface apparente ; cette valeur baissait à 0,940 pour la densité de courant 1,25 , à 0,860 pour la densité de courant 3,0 et à 0,766 pour la densité de courant 5,0 ampères par décimètre carré. Comme, d'autre part, le rendement en quantité s'élève également et peut atteindre ici 0,97, on voit que le rendement en énergie est susceptible d'atteindre la valeur très élevée 0,97.0 , 971 = 0,94, valeur qui, évidemment, baisse avec l'intensité du courant et aussi avec la longueur des périodes successives de décharge et de charge. Elle dépend aussi de la concentration, les chiffres précédents se rapportant à la concentration 29° B. qui correspond sensiblement au minimum de résistivité de l'acide et est la position la plus avantageuse.

Le rendement en énergie dépend de la température. On a vu précédemment que le rendement en quantité diminue quand la température s'élève. Le rendement en énergie doit donc se ressentir de cette première influence ; mais, d'un autre, côté le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ se rapproche d'autant plus de l'unité que la température est élevée, ainsi

qu'il résulte des courbes données dans les *fig.* 17 et 18. Pour les températures 16°,5 et 41° C., nous avons trouvé dans les mêmes conditions de charge et de décharge $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}} = 0{,}895$ à $0{,}858$, selon le régime, pour $t = 16°{,}5$ C., et $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}} = 0{,}932$ à $0{,}901$ sous les mêmes conditions pour $t = 41°$ C.

Par suite de ces deux influences inverses, le rendement en énergie est relativement peu dépendant de la température ; cependant, quand celle-ci atteint une certaine valeur, le rendement en quantité baisse plus rapidement que n'augmente $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ et le rendement en énergie diminue.

Les causes de perte en énergie sont d'abord celles que nous avons signalées à propos du rendement en quantité. En outre, il y a la perte de chaleur due à la résistance intérieure et la perte d'énergie due aux variations de la force électromotrice en charge et en décharge. La perte due à la résistance intérieure est la plus importante des deux lorsqu'il s'agit de décharges et charges partielles successives effectuées à densité de courant assez élevée. Si on appelle c_1 la concentration moyenne correspondant à l'état de charge et c_2 celle moins élevée de décharge, la deuxième cause de perte correspond à la chaleur de dilution d'une quantité d'acide sulfurique égale à la quantité active (proportionnelle au nombre d'ampères-heures) passant de la concentration c_1 à la concentration c_2. Cette perte est la plus importante dans le cas de charges et décharges complètes à faible densité de courant.

Conclusions relatives à l'accumulateur au plomb. — Les qualités générales de l'accumulateur au plomb, telles qu'elles résultent de l'étude que nous venons de faire, permettent à cet appareil des applications très variées, depuis les éléments robustes employés à poste fixe jusqu'aux éléments légers utilisés en automobilisme.

On reproche à l'accumulateur au plomb d'être coûteux d'entretien. Quoiqu'il soit désirable, en effet, de pouvoir réduire ce coût d'entretien, il ne faut pas en exagérer l'importance. A l'heure actuelle, une batterie bien conduite, d'un prix d'achat de 0f,20 à 0f,30 par ampère-heure (au régime de dix heures) et par élément, ne donne lieu, comme entretien annuel, qu'à une dépense de 5 à 10 0/0 du prix d'achat. Il est certain que, dans ces conditions, la présence des batteries d'accu-

mulateurs dans les installations à courant continu est le plus souvent non seulement indispensable au point de vue du fonctionnement, mais encore économique, si on considère le prix de revient de l'énergie électrique.

D'un autre côté, on reproche à l'accumulateur au plomb d'être trop lourd dans les applications transportables. Certes il y a lieu de souhaiter très vivement des progrès dans ce sens. Mais il faut reconnaître qu'à ce point de vue l'accumulateur au plomb répond suffisamment bien aux besoins de l'électromobilisme urbain, qui est de toutes les applications celle qui exige la plus grande énergie spécifique.

Une voiture munie d'une batterie d'un poids de 30 à 35 0/0 du poids total parcourt facilement aujourd'hui 100 kilomètres à la vitesse de 20 kilomètres à l'heure, sans recharge. Ce résultat n'est obtenu, il est vrai, qu'en sacrifiant sur la durée des plaques. Cependant il résulte des chiffres indiqués par une compagnie que, sur 0f,462, dépense totale journalière par kilomètre-voiture, les frais d'entretien de batterie n'entrent que pour 0f,07. Il ne dépend donc pas uniquement de l'accumulateur que l'automobile électrique soit encore un article de luxe.

Examinons maintenant les conditions générales de fonctionnement des couples qui ont été proposés pour remplacer l'accumulateur au plomb.

Accumulateurs divers. — Parmi les accumulateurs autres que l'élément au plomb, on peut considérer une première classe d'éléments dans lesquels l'électrolyte est encore l'acide sulfurique. En remplaçant simplement dans l'accumulateur ordinaire le plomb par le zinc, on constitue un élément dont la réaction principale de fonctionnement :

$$Zn + 2H^2SO^4 + PbO^2 = ZnSO^4 + PbSO^4 + 2H^2O,$$

correspond à une force électromotrice de 2,3 à 2,4 volts et qui peut être suivie d'une deuxième réaction :

$$Zn + H^2SO^4 + PbSO^4 = ZnSO^4 + H^2SO^4 + Pb,$$

qui ne correspond qu'à une force électromotrice voisine de 0,5 volt et n'est par conséquent pas utilisable.

En outre de l'augmentation de la force électromotrice, l'accumu-

lateur au zinc donne sur celui au plomb l'avantage d'une plus grande capacité spécifique, car l'équivalent électrochimique du zinc est très inférieur à celui du plomb. Ainsi, tandis qu'il faut théoriquement 3gr,86 de plomb par ampère-heure, il suffit d'engager 1gr,21 de zinc pour produire la même quantité d'électricité. Si on joint à cela qu'il n'y a pas à tenir compte ici d'un coefficient d'utilisation, puisque le zinc engagé se dissout, on voit que, pour la même capacité, les cathodes en zinc pourront être de poids très inférieur à celui des cathodes en plomb. Les deux avantages ci-dessus se traduisent par une augmentation de l'énergie spécifique. Malheureusement l'élément a, à côté de cela, des inconvénients tels que toutes les tentatives faites pour rendre son emploi industriel ont jusqu'ici échoué. Le zinc, en effet, s'attaque à circuit ouvert et, malgré les procédés d'amalgamation employés, les actions locales restent importantes, et le rendement en quantité s'affaiblit. Un autre inconvénient très grave provient de la dissolution du métal actif pendant la décharge. La charge ramène celui-ci sur la cathode, sous forme de dépôt électrolytique. Or, on le sait, un bon dépôt exige des conditions qui sont en général incompatibles avec les nécessités des charges pratiques. Il se produit alors pendant la charge un dépôt irrégulier du métal, et, tandis qu'en certains points la couche peut être suffisamment épaisse pour venir toucher l'anode et provoquer ainsi des courts-circuits, en d'autres points elle est insuffisante. Il arrive même fatalement qu'une adhérence imparfaite provoque la chute de métal au fond du bac ; cette quantité de métal ainsi éliminé des réactions n'y entre plus que grâce à son attaque directe par l'électrolyte, d'où perte importante d'énergie.

Le remplacement du plomb à la cathode par le cadmium ou par le cuivre donne lieu aux mêmes observations que dans le cas du zinc ; mêmes avantages et mêmes inconvénients à des degrés variables. La force électromotrice est d'environ 2,3 volts avec le cadmium, elle n'est que de 1,2 à 1,3 volt avec le cuivre. On a essayé aussi comme cathodes l'antimoine, le bismuth, l'argent, etc., mais sans succès.

D'une façon générale dans cette classe d'accumulateurs, à égalité de rendement en ampères-heures, le rendement en énergie augmente avec la force électromotrice, par suite du rapprochement de l'unité du rapport $\frac{E_{moy}}{E'_{moy}}$.

Le remplacement de l'anode au peroxyde par une anode en acide antimonique, qui a été essayé par G. Darrieus, ne donne qu'une force électromotrice très faible (0,7 volt).

Le couple peroxyde de plomb, acide sulfurique, soude, zinc, donne une force électromotrice très élevée, 3,2 à 3,3 volts d'après H. Lake, mais offre comme inconvénients de nécessiter un vase poreux, d'avoir des actions locales très importantes et d'avoir la cathode soluble.

Dans une deuxième catégorie, on peut mentionner les accumulateurs à gaz. Malgré les résultats très intéressants obtenus notamment avec le palladium (Cailletet et Colardeau ont obtenu jusqu'à 176 ampères-heures par kilogramme de mousse de palladium à la pression de 600 atmosphères), la pile réversible à gaz n'est pas entrée dans le domaine industriel. Sa force électromotrice est faible, 1,2 à 1,3 volt ; la capacité spécifique, élevée quand on la rapporte au poids de mousse, diminue considérablement lorsqu'on la rapporte au poids total d'élément, récipients à gaz compris ; le rendement en énergie est très faible, 0,5 au maximum ; enfin les matières utilisées sont très coûteuses (le palladium vaut environ 10.000 fois plus cher que le plomb).

Dans une troisième catégorie, nous classerons les accumulateurs aux halogènes. Les piles réversibles au chlorure de zinc, bromure de zinc, chlorure de brome n'ont qu'une énergie spécifique inférieure à celle de l'accumulateur au plomb et des actions locales plus considérables. On obtient une énergie supérieure en employant la pression ; mais alors on se trouve en présence de grosses difficultés en ce qui concerne le récipient, dont le poids élevé vient d'ailleurs diminuer l'énergie spécifique. La pile réversible au chlorure de fer a une faible force électromotrice (un peu moins de 1 volt), une faible énergie spécifique, et nécessite la présence d'un vase poreux. L'élément zinc, chlorure d'argent, parmi tous ses inconvénients, présente celui d'un prix trop élevé pour qu'on puisse songer à son utilisation.

La classe la plus importante est actuellement celle des accumulateurs à électrolyte alcalin. Le premier type classique, le couple zinc, potasse, oxyde de cuivre, a paru présenter au début suffisamment de qualités pour justifier des tentatives d'application. Grâce aux faibles équivalents électrochimiques des substances employées, la capacité spécifique de cet élément est très supérieure à celle de l'élément au plomb ; malheureusement, la faible force électromotrice, 0,8 volt, rend l'énergie spécifique sensiblement égale à celle de l'accu-

mulateur au plomb. Les tentatives d'application n'ont pas été couronnées de succès par suite de l'attaque du zinc à circuit ouvert, de la solubilité de la cathode, et enfin par suite de la solubilité partielle de l'oxyde de cuivre qui s'électrolyse en charge et donne sur la cathode un dépôt de cuivre ; ce cuivre crée avec le zinc un couple parasite qui accélère l'attaque du zinc et rend très intenses les actions locales. Le rendement en énergie est inférieur à celui de l'accumulateur au plomb.

Le remplacement de l'oxyde de cuivre par l'oxyde de nickel a supprimé l'inconvénient de la solubilité partielle de l'anode. De plus, il a augmenté à 1,85 volt environ la valeur de la force électromotrice, le passage de Ni^2O^3 à l'état de NiO se faisant presque sans absorption ni dégagement de chaleur. Mais il reste toujours l'inconvénient de la cathode soluble et des actions locales énergiques.

Dans le groupe des accumulateurs à électrolyte alcalin, on peut placer les accumulateurs à électrolyte invariable, qui, jusqu'ici, n'ont été réalisés qu'avec un électrolyte alcalin. On appelle ainsi des piles réversibles dans lesquelles l'électrolyte ne participe pas aux réactions chimiques, l'anode et la cathode étant soumises simplement à des actions de réduction et d'oxydation à la décharge et à des actions inverses pendant la charge. On attribue ordinairement à E.-W. Jungner (brevet allemand 110210 du 31 mars 1899, brevet français 288713 du 10 mai 1899) la découverte de cette classe importante d'accumulateurs. Cependant, c'est G. Darrieus qui le premier en a revendiqué l'emploi et a montré les avantages de l'invariabilité de l'électrolyte. Dans son brevet français 233083 du 27 septembre 1893, non seulement cet auteur mentionne les électrodes insolubles, mais encore, parlant des réactions de charge et de décharge, il dit textuellement : « Tout se passe comme s'il y avait simple décomposition de l'eau et simple transport d'hydrogène ou d'oxygène d'un pôle à l'autre, etc. » C'est bien là la définition de l'invariabilité de l'électrolyte. Parmi les couples cités par G. Darrieus se trouvent le couple bismuth, soude ou potasse, oxyde de cuivre, le couple cadmium, potasse ou soude, oxyde de cuivre (antériorité incontestable au brevet Edison 305563 du 20 novembre 1900). Le fer et le nickel sont encore signalés, au même titre que le cadmium, le bismuth et le cuivre, parmi les corps les plus aptes à constituer des électrodes de cette nouvelle catégorie d'accumulateurs brevetée depuis par Jungner et par Edison soit au point de vue général, soit à quelques points de vue particu-

liers. Comme une étude même résumée de tous les couples de cette catégorie nous entraînerait trop loin, nous ne retiendrons que le couple fer, potasse, oxyde de nickel, qui a fait l'objet des brevets Edison (brevets français 307864 et anglais 2490, tous deux du 5 février 1901) et que Jungner avait également breveté (brevet suédois 15567 du 22 janvier 1901 et brevet français 314427 du 23 septembre 1901) en indiquant non le fer, mais son hydroxyde $Fe(OH)^2$, comme matière active de la cathode.

L'accumulateur fer-nickel est certainement, de tous les accumulateurs autres que l'élément en plomb, celui sur lequel les plus grandes espérances ont été fondées depuis 1901. Aussi l'étudierons-nous d'un peu près, comparativement à l'accumulateur actuel.

Au point de vue théorique, il n'y a pour ainsi dire rien de connu, et les travaux sur cette question manquent absolument. Si nous supposons que l'équation réversible de décharge est :

$$Fe + KOH + Ni^2O^3 \rightleftarrows FeO + KOH + 2NiO,$$

nous trouvons d'après les données thermochimiques un dégagement de chaleur de

+ 69 calories pour l'oxydation de Fe en FeO,
— 0,6 — la réduction de Ni^2O^3 en 2NiO,

soit en tout 68,4 calories correspondant à $\frac{68,4}{2,23} = 1,48$ volt environ, valeur voisine de celle que l'on observe. C'est cependant une simple hypothèse, et il est possible notamment que le degré d'oxydation du nickel soit supérieur à Ni^2O^3 (NiO^2 par exemple) et que les oxydes engagés dans les réactions affectent la forme hydratée.

Edison admet que, pendant la décharge, il y a réduction de NiO^2 en Ni^2O^3; mais les données thermochimiques relatives à NiO^2 manquent, et il est impossible d'exprimer les chaleurs dégagées dans ce cas.

Sans vouloir entrer dans les détails de description, disons que les plaques, positives comme négatives, sont constituées à l'aide de cuvettes en tôle d'acier très mince et perforée qui renferment des briquettes de matière active et sont assemblées dans un cadre en tôle d'acier nickelée. Les briquettes sont obtenues par compression élevée de sesquioxyde de nickel mélangé à du graphite dans le cas de la positive, et de fer réduit (oxyde de fer chauffé dans un

courant d'hydrogène) et également mélangé soit à du graphite, soit à un autre corps conducteur, dans le cas de la négative.

L'allure de décharge d'un élément Edison est comparable à celle de l'élément au plomb, les valeurs de la différence de potentiel étant plus faibles. La *fig.* 20 montre cette allure, d'après les essais faits au Laboratoire central d'électricité. Lorsqu'on pousse la décharge, on trouve cependant un second palier dû à l'électrode négative qui se réduit sans doute à un degré d'oxydation inférieur. Les courbes I

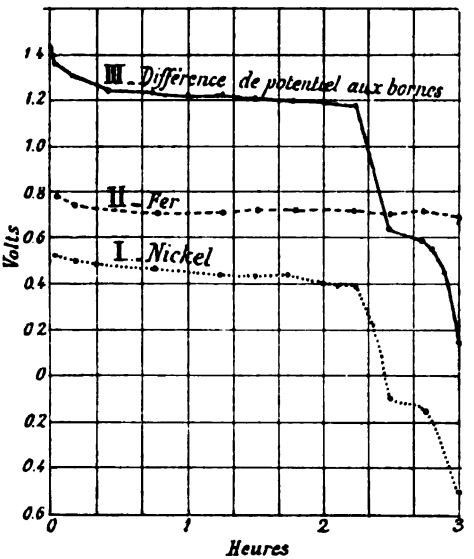


Fig. 20.

et II, qui se rapportent aux tensions anodique et cathodique en prenant une électrode auxiliaire nickel (on se servait ici du bac en acier nickelé), indiquent bien que le second palier est imputable à la positive et que c'est celle-ci qui limite la capacité. Dans les cas où on peut pousser la courbe de la négative, on trouve aussi quelquefois un second palier. Il est assez naturel que la capacité soit limitée par la positive ; en effet, si l'on admet avec Edison que les réactions de la décharge sont bien une oxydation de Fe en FeO et une réduction de Ni^2O en Ni^2O^3, il faut théoriquement $1^{gr},045$ Fe par ampère-heure, tandis qu'il faut $3^{gr},383$ NiO^2.

Si on détermine la variation de la tension moyenne aux bornes

en fonction de l'intensité de décharge, on trouve qu'elle baisse plus vite que dans le cas de l'élément au plomb. Le fait doit être probablement imputable à une résistance intérieure un peu plus grande. Cette résistance intérieure de l'élément Edison dépend surtout de la résistance des électrodes, puisque, pour une résistance de 0,000023 ohm pour l'électrolyte (potasse à 20 0/0), M. Janet a trouvé une résistance moyenne de 0,003 ohm pour l'élément. Entre la fin de charge et la fin de décharge, la résistance augmentait de 0,0025 à 0,0035 ohm.

Tous les essais faits sur l'accumulateur Edison montrent que, dans de grandes limites d'intensité de décharge, la capacité baisse peu.

C'est là un avantage incontestable sur l'accumulateur au plomb et qui tient certainement en grande partie à l'invariabilité de l'électrolyte, celui-ci n'entrant pas en réaction, comme il le fait dans l'accumulateur au plomb. Ainsi, entre la décharge en sept heures et celle en quarante-sept minutes, la capacité massique ne baisse que de 21,4 à 19,65 ampères-heures par kilogramme d'élément, et l'énergie massique de 27,75 à 20,04 watts-heures par kilogramme d'élément.

Si on compare au point de vue de l'énergie, on trouve qu'au régime de cinq heures (le plus courant dans l'application aux automobiles) l'élément Edison ne donne qu'une énergie massique égale à celle des meilleurs accumulateurs au plomb. Au régime de trois heures, l'énergie massique de l'élément Edison devient supérieure de 10 à 15 0/0.

En revanche, à égalité d'encombrement, l'accumulateur Edison donne une énergie de 20 0/0 environ inférieure à celle de l'accumulateur au plomb au régime de cinq heures et de 5 0/0 au moins au régime de trois heures.

La capacité de l'élément fer-nickel est dépendante de la température, ainsi que l'indiquent les courbes de la *fig.* 21, données par M. Janet. On en déduit qu'entre 0 et 50° C. la capacité augmente d'environ 0,54 0 0 par degré C. Cette variation est moins grande que dans le cas de l'accumulateur au plomb, pour lequel on trouve, au régime correspondant, un coefficient au moins double et quelquefois triple ou quadruple, selon le type de plaque. Cette différence est encore explicable par ce fait que, dans l'élément fer-nickel, l'électrolyte ne participe pas aux réactions chimiques.

Des expériences effectuées au Laboratoire central d'électricité il

résulte qu'après huit jours l'élément Edison essayé avait perdu 12 0/0 de sa capacité. Au point de vue des actions locales, cet élément ne serait donc pas supérieur à l'accumulateur au plomb (un bon élément peut ne perdre que 5 0/0 de sa capacité en huit jours).

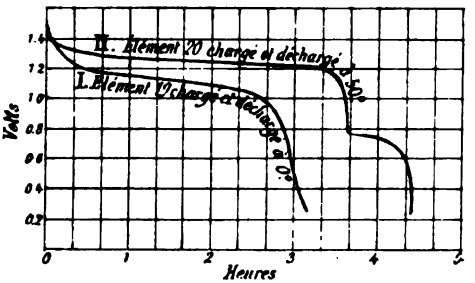


Fig. 21.

La comparaison au point de vue du rendement est tout à fait défavorable à l'élément fer-nickel, avec lequel on ne dépasse pas 0,50 pour le rendement en énergie. Cette faible valeur est due non seulement à ce que le rendement en quantité est plus faible que celui de l'élément au plomb, mais encore à ce que le rapport $\frac{e_{moy}}{e'_{moy}}$ est notablement plus faible; ce rapport est voisin de 0,7, tandis qu'il atteint facilement 0,8 dans le cas des décharges complètes avec l'élément au plomb. La différence tient en partie à la résistance intérieure plus grande du couple fer-nickel.

Au point de vue de la durée, si certains essais n'ont pas paru favorables à l'élément fer-nickel, d'autres, au contraire, et notamment ceux effectués au Laboratoire central d'électricité, ont montré que l'élément Edison a une durée supérieure à celle des accumulateurs au plomb légers actuellement employés pour les automobiles.

Pour résumer, on peut dire que l'élément fer-nickel présente un très réel intérêt. Il tient ses qualités de l'emploi de substances à faible équivalent électrochimique et de l'invariabilité de l'électrolyte. Celui-ci ne participant pas aux réactions, il n'y a pas à craindre d'en réduire la masse. Cela permet de réduire à la fois le poids et l'encombrement et de rendre la capacité de l'élément moins dépendante des principaux facteurs variables que celle de l'élément au plomb. Malheureusement on ne tire pas de ces avantages tout le bénéfice

qu'on serait en droit d'en attendre, par suite du faible coefficient d'utilisation de la matière et de sa résistance relativement élevée, ce qui nécessite l'addition de matières conductrices inactives augmentant le poids et l'encombrement.

Au point de vue pratique, l'élément fer-nickel, dans son état actuel, ne peut guère être utilisé que dans des cas exceptionnels, à cause de son mauvais rendement et de son prix élevé (2 à 3 fois le prix de l'élément au plomb à égalité d'énergie), qui l'éliminent complètement de toutes applications à poste fixe. Dans les éléments légers transportables, il ne peut devenir avantageux au point de vue de l'énergie spécifique que dans le cas de décharges et charges très rapides (cas des tramways à charge rapide par exemple); mais là encore il ne peut être économique que dans des cas spéciaux, à cause des frais élevés d'intérêt et d'amortissement auxquels il donne lieu et des dépenses de courant que son mauvais rendement nécessite.

Mais il faut bien remarquer que l'élément fer-nickel est tout jeune et qu'il a fallu bien des années pour faire de l'élément au plomb l'indispensable auxiliaire de l'industrie électrique que nous connaissons aujourd'hui.

Considérations générales relatives à la possibilité d'obtenir un couple réversible supérieur à l'accumulateur au plomb. — De l'étude que nous venons de faire, il résulte que, si certains éléments présentent sur quelques points une supériorité sur l'accumulateur au plomb, celle-ci est rachetée par des inconvénients beaucoup plus importants sur d'autres points.

Il serait par trop pessimiste d'en conclure qu'il est impossible de trouver une pile réversible supérieure à l'élément au plomb; mais il faut bien dire que la multiplicité des conditions à réunir rend la solution très difficile. Examinons ces conditions générales.

Pour réaliser un accumulateur à énergie spécifique élevée, il faut une force électromotrice et une capacité aussi grandes que possible.

On obtiendra une force électromotrice élevée en choisissant des substances capables de dégager de grandes quantités de chaleur pendant les réactions chimiques qui s'accomplissent en décharge.

A l'électrode négative on doit faire choix d'un métal ayant une tension de dissolution aussi élevée que possible. Malheureusement, on est rapidement arrêté dans cette voie ascendante par l'attaque chimique directe du métal par l'électrolyte. Cette attaque étant déjà très importante avec le zinc, dans le cas d'emploi d'électrolytes

acides ou basiques, on ne peut songer à employer les métaux alcalins ou alcalino-terreux, qui sont attaqués directement par l'eau. Et c'est grand dommage, car ces métaux permettraient des forces électromotrices très élevées. De ce côté, la seule chance de salut serait la découverte d'un dissolvant autre que l'eau, capable d'un pouvoir de dissociation suffisant et attaquant moins facilement les alcalins ou alcalino-terreux. Aucune recherche ne paraît avoir été tentée dans cette voie ; les chances de réussite sont d'ailleurs bien faibles, car le dissolvant doit, en outre, être simple et ne pas changer de composition pendant l'électrolyse.

Sauf dans le cas d'emploi de sels haloïdes, l'halogène se recombinant directement avec le métal pendant la décharge, on emploie à l'électrode positive un corps plus ou moins oxydé qui, pendant la décharge, se réduit plus ou moins. Cette réduction se fait tantôt avec dégagement, tantôt avec absorption de chaleur; ce dernier cas est malheureusement le plus général. En vue d'obtenir une force électromotrice élevée, il importe de choisir comme dépolarisant à l'électrode positive une substance dont les réactions de décharge donnent lieu à un dégagement de chaleur. C'est ce qui a été réalisé d'une façon presque unique jusqu'à ce jour par le peroxyde de plomb dans l'acide sulfurique.

Le nombre des combinaisons à proposer est très restreint, par suite de la condition d'insolubilité de la matière positive dans tous ses états, si on veut éviter le dépôt, sur la négative, du métal qui entre dans la composition du dépolarisant, fait qui occasionne, comme on a vu, des actions locales énergiques et une destruction de l'anode. On doit même imposer comme condition l'insolubilité de la matière active négative dans tous ses états, si on veut un accumulateur réellement industriel et exempt des inconvénients inhérents au dépôt électrolytique opéré pendant la charge, inconvénients que nous avons déjà signalés et dont les principaux sont l'irrégularité du dépôt et souvent son manque d'adhérence dans les conditions ordinaires d'emploi de l'accumulateur.

La capacité que peut donner une matière active dépend de son équivalent électrochimique et du nombre de valences engagées. C'est ainsi que l'oxyde de cuivre CuO passant à l'état de cuivre métallique donne une capacité double du sous-oxyde Cu^2O passant également à l'état de cuivre métallique. Un autre exemple est donné par le peroxyde de plomb, qui, passant à l'état de plomb métallique,

comme cela est possible en employant une cathode en zinc, donne une capacité double de celle qui correspond à la réduction simple du peroxyde en sulfate de plomb, comme cela a lieu avec la cathode en plomb spongieux. Bien entendu, à chacune des valences engagées, la force électromotrice peut varier (c'est le cas du couple peroxyde de plomb-zinc), si les chaleurs de réaction varient également. Plus faible sera l'équivalent électrochimique et plus grande sera la capacité spécifique. Le plomb ayant un équivalent électrochimique élevé, il n'est pas difficile de trouver de métaux supérieurs à lui à ce point de vue.

En pratique, il y a lieu de tenir compte, en outre, d'un certain coefficient d'utilisation, les substances actives insolubles ne pouvant être, en général, engagées complètement dans les réactions pendant la décharge. Pour l'accumulateur au plomb, par exemple, on a vu qu'il est difficile d'utiliser plus de la moitié de la matière active. Le coefficient d'utilisation, variable avec les différentes substances, dépend, pour chacune d'elles, de l'état physique, de la porosité, de la conductibilité. Ce coefficient d'utilisation se rapproche d'autant plus de l'unité que les substances actives et aussi leurs produits de transformation en décharge sont conducteurs et que la porosité tend à augmenter pendant la décharge, ce qui a lieu avec l'emploi, comme substances anodiques, d'oxydes ou de sels métalliques (Cu^2O, AgCl, $PbCl^2$, etc.), qui se réduisent à l'état métallique pendant la décharge. C'est le contraire qui arrive dans l'accumulateur au plomb, où la matière active se sulfate et diminue de porosité ainsi que de conductibilité.

Si on aborde le côté économique, on constate d'abord que le choix des matières susceptibles d'être employées est limité par le prix de ces matières. Le nickel a déjà une valeur élevée (450 francs les 100 kilogrammes); dans l'ordre décroissant des prix viennent les métaux usuels suivants : l'aluminium, l'étain, le cuivre, l'antimoine, le zinc, le plomb, le fer.

Un autre point dont l'importance n'est pas à démontrer est la durée des plaques. Les effets actuellement connus des actions électrolytiques permettent d'affirmer que toutes les plaques d'accumulateurs doivent avoir fatalement une durée limitée. Même en admettant une insolubilité suffisante des matières actives, ce n'est pas impunément que l'on soumet celles-ci à des charges et décharges successives, qui changent à tout instant leur état physique comme leur composition chimique. C'est là la source de dégradation de la

plaque, ou même simplement, si la matière active ne tombe pas, de la variation de capacité de cette plaque.

En outre, l'action électrolytique s'exerçant sur les supports attaque ceux-ci plus ou moins rapidement. Il est permis de supposer qu'il peut exister des plaques à plus grande durée que celles de l'accumulateur au plomb. Cependant aucune jusqu'à ce jour n'a pu réunir cette qualité avec les différentes autres que nous avons examinées et qui sont indispensables.

Au point de vue économique intervient aussi le rendement de l'accumulateur. Nous avons vu qu'à ce propos l'accumulateur au plomb est certainement un des mieux placés. Dans les accumulateurs à faible force électromotrice, la surélévation de celle-ci à la fin de la charge, par suite de la séparation des ions de l'électrolyte, est en général relativement plus importante que lorsque la force électromotrice est plus grande. C'est ainsi qu'on obtient pour l'accumulateur cuivre, acide sulfurique, peroxyde de plomb, par exemple, un rendement en énergie (pour un même rendement en quantité) moindre qu'avec l'accumulateur au plomb.

Le meilleur accumulateur à ce point de vue serait un élément à électrolyte invariable, à faible résistance intérieure, sans actions locales, et dont la force électromotrice serait aussi voisine que possible de la tension nécessitée par la séparation des ions de l'électrolyte. Les éléments aux sels haloïdes de zinc sont en très bonne posture à cet égard, car ils ne présentent pas de surélévation de tension à la fin de la charge, si on n'épuise pas complètement l'électrolyte.

Ces quelques considérations suffisent à montrer les difficultés du problème.

Il faut souhaiter que celles-ci puissent être rapidement résolues, soit par des perfectionnements encore possibles de l'accumulateur au plomb, soit par la mise au point d'un élément de la classe si intéressante des accumulateurs à électrolyte invariable, soit par toute autre voie.

C'est sur ce vœu que je terminerai en vous remerciant, Messieurs, de la bienveillante attention que vous avez bien voulu me prêter.

LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DANS LA CONSTRUCTION DES ALTERNATEURS (1)

Par M. Boucherot,
Ingénieur-conseil.

Messieurs,

J'ai la bonne fortune d'avoir été soulagé d'une partie de ma tâche par M. Janet, qui, dans le langage clair et précis dont il est coutumier, vous a, parmi d'autres choses d'égal intérêt, mis au courant de l'évolution morphologique des alternateurs et des principales préoccupations des ingénieurs électriciens à l'égard de ces machines.

Néanmoins il me reste beaucoup de choses à dire, j'ajouterai même que je suis plutôt embarrassé par le choix à faire parmi tout ce qui pourrait être signalé.

On a dit souvent que ce qui caractérise le plus l'industrie électrique, c'est l'énorme rapidité de son évolution. Cela ne s'est pas fait toujours sans douleurs : en particulier le développement des courants alternatifs a rencontré au début, en France, des résistances opiniâtres. Sauf quelques rares constructeurs, parmi lesquels je suis heureux de pouvoir citer notre précédent conférencier, M. Hillairet, et sauf quelques ingénieurs qui criaient comme des sourds sans qu'on les entende, tout le monde, des hommes considérables comme les plus humbles monteurs électriciens, tout le monde faisait bloc contre les courants alternatifs.

Je crois que cela est dû surtout à ce que c'est en France, sous la forme « continu », que l'électricité a commencé réellement cette belle évolution industrielle.

Quoi qu'il en soit, aussi bien pour les courants alternatifs, depuis qu'ils ont pris place au soleil, que pour le courant continu, chacun peut faire cette constatation qu'il y a, parallèlement à ce développement rapide des applications, une énorme production littéraire. La littérature électrique est encombrée d'une multitude d'inventions qui n'ont jamais eu et n'auront jamais d'applications, de conceptions d'appareils n'ayant jamais pris une place quelconque dans l'industrie, et même de théories qui, non seulement ne sont employées par

(1) Conférence faite le 30 mai 1905.

personne, mais sont souvent en désaccord avec les faits. Mêlées à tout cela, il y a encore beaucoup de bonnes choses. Je ferai mon possible pour ne choisir que parmi elles.

Je dois d'abord résumer ce que tout le monde sait plus ou moins.

Un alternateur se compose d'un inducteur et d'un induit pouvant être, l'un ou l'autre, fixe ou mobile, intérieur ou extérieur. L'inducteur est presque toujours mobile, et il est plus souvent à l'intérieur de l'induit qu'à l'extérieur, mais ce n'est pas une règle absolue.

Voici une machine, par exemple (*Projection*), dans laquelle on peut croire, à première vue, que c'est l'induit qui est mobile, parce qu'il paraît calé sur l'axe de la machine à vapeur; cependant il est fixe, et c'est l'inducteur extérieur qui est mobile. Il y a relativement peu de ces machines, mais il y en a assez pour que l'on puisse en faire état (1).

Ceci posé, deux catégories d'alternateurs : ceux dans lesquels le flux passant dans une bobine induite change de sens : ce sont les alternateurs dits hétéropolaires ou à pôles alternés, et ceux dans lesquels le flux passant dans une bobine induite varie seulement d'une certaine valeur à une autre valeur voisine de zéro : ce sont les alternateurs homopolaires ou à flux ondulé (*Projection*).

Je n'ai que ce cliché montrant les détails d'une machine à flux ondulé. Comme je n'aurai plus l'occasion d'en parler ultérieurement, je vais en donner pour mémoire quelques explications. Dans ces machines, il y a deux induits, l'un qui se trouve ici, en avant, et l'autre masqué par derrière. A l'intérieur de ces induits tourne une sorte de poulie munie de proéminences, le tout en fer, qui constitue l'inducteur, ou *fer tournant;* entre les induits, une bobine magnétisante unique et fixe, que l'on ne voit pas ici, et qui se trouve dans l'axe de la machine. Cette bobine produit de chaque côté du fer tournant une série de pôles de même nom. Le flux, dans une bobine, par exemple celle qui se trouve ici, passe simplement de zéro à un minimum, sans se renverser.

Ce genre de machines tend de plus en plus à disparaître, malgré des avantages sérieux : en particulier, la présence d'une bobine magnétisante unique et fixe, l'absence d'enroulements mobiles, et conséquemment l'absence de bagues et frotteurs; il en résultait une grande simplicité et une conduite facile.

---

(1) La machine représentée en *fig.* 19 est aussi de ce genre.

Malheureusement ces machines sont très lourdes pour une puissance déterminée ; c'est pour cette raison qu'on les abandonne.

Tout ce qui va suivre maintenant concernera donc plus spécialement les alternateurs à pôles alternés. Par une série de projections, je vais vous faire assister à la réalisation d'une telle machine (*Projections*).

L'inducteur se compose des pôles proprement dits, des bobines magnétisantes placées sur ces pôles et d'une culasse servant au passage du flux d'un pôle à l'autre. Les pôles sont pleins ou feuilletés, suivant les circonstances ; ou encore pleins avec épanouissements feuilletés.

En tous cas ils sont toujours réalisés avec des métaux très perméables. Ces pôles, étant enveloppés d'une bobine magnétisante, doivent, pour un même flux, avoir un périmètre aussi réduit que possible ; on a donc intérêt à employer des matériaux de très haute perméabilité. Il n'en est pas de même pour la culasse, qui peut être de fonte ou d'acier. Lorsqu'elle est en fonte, il faut y encastrer les pôles pour éviter certains effets secondaires.

Les bobines magnétisantes peuvent être, suivant les circonstances, réalisées avec des barres ou des fils de cuivre. Dans cette machine (*Projection*), les bobines sont faites de barres de cuivre posées sur champ. Ces barres de cuivre donnent à la machine un bel aspect, mais il n'est pas toujours possible de réaliser l'enroulement de cette manière, parce que la section de la barre ne peut pas descendre au-dessous d'une certaine valeur.

L'induit est composé de tôles assez fines pour que la perte par les courants de Foucault soit faible à la fréquence normale de la machine. On adopte généralement des tôles de 3 ou 4 dixièmes de millimètre d'épaisseur. Ces tôles sont isolées entre elles par du papier ou du vernis.

Lorsqu'elles sont de petites dimensions : 1 mètre, $1^m,10$ de diamètre, elles peuvent être d'une seule pièce. Quand le diamètre dépasse $1^m,10$, les anneaux sont formés par la réunion de segments chevauchés et boulonnés ensemble (*Projection*). Cette photographie représente le support d'induit d'une machine montée sur le tour pour le travail. Quelques segments de tôles y sont disposés pour examiner comment les pièces se présentent. Vous voyez ici un segment, qui va depuis ici jusque-là ; le second segment commence ici, va jusque-là, et ainsi de suite.

Ces segments sont percés de deux séries de trous; les trous d'enroulement, que voici, et les trous d'assemblage, qui sont ici, ces trous ronds. Lorsqu'on a placé une première couche de tôles, comme celle que vous voyez, on dispose la seconde de manière que ses segments chevauchent sur ceux de la première et ainsi de suite. L'induit est ainsi réalisé, sans solution de continuité, de sorte que l'ensemble boulonné forme une chaîne fermée d'une grande rigidité (*Projection*).

Voici une machine du même genre, mais plus grande; le montage des tôles est terminé. On voit ici les boulons d'assemblage de ces tôles. Évidemment, on réserve dans l'épaisseur des paquets de tôles des cheminées de ventilation, en nombre plus ou moins grand, suivant l'épaisseur de l'induit. Ici, l'induit ayant une vingtaine de centimètres de profondeur, il y a seulement une cheminée de ventilation.

Les trous d'enroulement ou encoches, que vous voyez assez mal ici, sont tantôt de forme circulaire ou elliptique, tantôt droits. Dans le premier cas, on dit que la denture est épanouie; dans le second, la denture est droite (*Projection*).

Voici un autre induit dans lequel vous pouvez voir encore l'assemblage des tôles. Voici les trous d'enroulement; ils sont de forme elliptique (plus exactement un rectangle terminé par deux portions de cercle). La denture droite a cet avantage que l'on peut entrer les bobines d'enroulement toutes faites dans le paquet de tôles, tandis qu'avec la denture épanouie il faut passer les fils, un à un, dans les entailles, ce qui est une difficulté pour le constructeur. Mais, d'autre part, la denture épanouie présente des avantages sur l'autre au point de vue des qualités intrinsèques de la machine.

Les conducteurs servant à l'enroulement sont des fils jusqu'à 4 ou 5 millimètres de diamètre au plus. Au delà, les fils seraient trop durs pour que l'on puisse les faire passer dans les encoches. On adopte alors ou bien le câble, constitué par un ensemble de fils fins, ou la barre pleine (*Projection*).

Voici d'abord un induit enroulé avec du câble. C'est du câble d'une centaine de millimètres carrés de section, relativement flexible, et facile à faire passer par les encoches (*Projection*).

Ici, au contraire, vous avez affaire à un induit formé de barres pleines. Vous voyez qu'une spire est alors formée de deux conducteurs; chaque conducteur est en forme d'L ou de Z et est plié une ou deux fois; il y a deux couches de conducteurs. On fait alors des

soudures aux deux extrémités; celle-ci, par exemple, réunit un câble qui vient de cette encoche à un autre câble qui vient de cette autre encoche. Chaque bobine est ainsi faite sur place et les bobines sont reliées généralement en série.

Le couplage des bobines se fait généralement en série dans chaque phase de l'induit. Dans les inducteurs, il est presque nécessaire de coupler les bobines en série, de façon à ne pas s'exposer à une dissymétrie considérable dans l'attraction magnétique des diverses parties de la machine. Supposez un inducteur connecté en deux séries parallèles, par exemple, et qu'une des séries soit coupée accidentellement, toute l'attraction de ce côté disparaîtrait, elle subsisterait de l'autre côté; il pourrait en résulter des accidents sérieux.

Je terminerai cette partie descriptive par quelques considérations mécaniques et quelques réflexions sur les préoccupations qui guident le constructeur dans le choix des dimensions.

M. Janet nous a dit que, selon lui, les constructeurs sont arrivés à faire, pour les grandes puissances, des machines de grand diamètre, parce qu'ils ont plus d'avantage à augmenter le diamètre que la profondeur, et que la réduction de la vitesse angulaire a été une conséquence de l'augmentation du diamètre. Je ne crois pas que la question se soit présentée bien souvent sous cette forme. J'ai toujours constaté, au contraire, que la vitesse angulaire est imposée par le moteur destiné à conduire l'alternateur. Je suis de l'avis exprimé une fois par M. Picou que cette manière de faire est plutôt mauvaise et qu'il vaudrait mieux, pour la vitesse comme pour le reste, que le mécanicien fasse sa machine plus en vue de l'application à un alternateur. Nous y sommes déjà arrivés en partie, puisque les constructeurs de moteurs à vapeur à vitesse faible ont fait progressivement passer leurs vitesses de 60 à 150 tours par minute. Mais, si cela ne dépendait que de nous, électriciens, les vitesses angulaires seraient toujours plus grandes qu'elles ne sont pour les machines à pistons; et la preuve, c'est que, bien qu'un peu trop copieusement servis à cet égard par les turbines à vapeur, nous avons assez facilement adapté nos alternateurs aux vitesses de ces moteurs et réalisé des alternateurs pour turbines moins coûteux que les alternateurs volants, volant déduit.

Quand on cherche quel est l'effet de la force centrifuge sur un anneau de section petite par rapport au diamètre, tournant autour

de son centre, tel que celui-ci (*fig.* 1), on trouve que la tension moléculaire, qui tend à diviser l'anneau, est simplement proportionnelle à la densité du métal et au carré de la vitesse linéaire; en C. G. S. : $T = \delta V^2$. Le rayon, qui intervient dans la force centrifuge d'un élément pris isolément, n'intervient pas dans la tension.

Il n'en est pas tout à fait de même d'un volant ou d'une culasse d'inducteur portant des pôles et ayant une certaine épaisseur, puisque les pôles viennent ajouter une masse supplémentaire; mais, pratiquement, on peut admettre qu'il en est ainsi, en majorant la densité d'une certaine quantité.

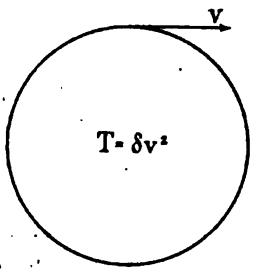


Fig. 1.

Si donc on était uniquement guidé dans les calculs par le désir d'obtenir toujours la plus grande vitesse linéaire, tous les alternateurs de même vitesse angulaire auraient à peu près le même diamètre extérieur; il n'en est rien. Pour une même vitesse angulaire, le diamètre augmente avec la puissance, tant que l'on peut augmenter le diamètre sans compromettre la solidité.

C'est qu'en effet il y a autre chose à considérer que la matière active, électrique ou magnétique : il y a les matériaux de soutènement qui doivent se payer également (*Projection*). Si la force centrifuge existait seule, on pourrait se dispenser de donner à l'induit de la machine que je projette une pareille rigidité, puisque cet induit est complètement fixe; mais il y a encore les attractions magnétiques qui, dans une machine telle que celle que vous avez sous les yeux, atteignent une valeur considérable. Dans un induit tel que celui-ci, l'attraction totale périphérique des pôles se chiffre par environ 50.000 kilogrammes. Il faut donc que l'induit et l'inducteur soient assez rigides pour ne pas se déformer sous l'influence de ces forces considérables. Bien plus, que les centres de l'inducteur et

de l'induit viennent à se déplacer d'une quantité très petite l'un par rapport à l'autre, l'attraction augmente d'un côté, diminue de l'autre, et ce déplacement produit une différence entre les attractions des deux côtés, qui peut atteindre facilement 9 ou 10.000 kilogrammes pour 1 millimètre, c'est-à-dire le poids des pièces elles-mêmes.

En fait, il arrive qu'avec des décentrements importants, dans les grandes machines, le poids des pièces ne compte plus ; la partie tournante libérée des paliers se trouve soulevée comme une plume par la différence des efforts magnétiques. Si, sous l'influence de cette différence, pour un faible décentrement, les pièces fléchissaient d'une façon appréciable, le décentrement s'accentuerait jusqu'au contact entre l'inducteur et l'induit, contact qui produirait des accidents très graves, vous n'en doutez pas.

Pour éviter cela, on est donc amené à donner aux matériaux de soutènement que vous voyez ici des dimensions et un poids considérables relativement, ce qui se paye.

Cela se paye d'autant plus cher que le diamètre est plus grand, parce que l'épaisseur de ces pièces doit croître avec le diamètre, en sorte que le poids augmente bien plus que le diamètre.

C'est pourquoi les dimensions des machines ne sont pas déterminées par des considérations aussi simples qu'on pourrait croire au premier abord.

Dans les débuts, on ne se préoccupait pas de la forme de la courbe de tension des alternateurs. Il y avait bien la méthode de M. Joubert qui permettait de relever cette courbe avec soin; mais, comme il fallait, pour l'appliquer, faire une installation spéciale, et que, d'autre part, on ne connaissait pas les inconvénients des harmoniques, on se contentait de les ignorer. On avait ainsi parfois des courbes très fantaisistes. Les harmoniques se chargèrent de nous faire penser à eux.

Leurs inconvénients sont de plusieurs sortes. Les harmoniques donnent lieu, d'abord, à des courants de circulation entre l'alternateur et les appareils d'utilisation ou, simplement, à des courants de capacité dans les câbles, qui augmentent les pertes par effet Joule dans les circuits en activité. Mais c'est là peu de chose en comparaison des surtensions qu'ils peuvent provoquer. Vous savez que, lorsque la fréquence propre d'oscillation d'un circuit contenant une self-induction et une capacité est égale à la fréquence de la force

électromotrice qu'on lui applique, le courant passe dans ce circuit comme s'il n'y avait que la résistance, sans capacité ni self-induction, et que la tension aux bornes de la self-induction ou de la capacité peut se trouver considérablement plus grande que la tension appliquée.

Ici la self-induction, c'est celle de l'alternateur; la capacité, c'est celle de la ligne; elle devient assez importante quand elle est de longueur moyenne et à câbles concentriques, ou quand elle est aérienne et très longue.

La capacité n'a jamais été, jusqu'ici, assez grande pour faire résonner la fréquence fondamentale, mais elle l'a été assez souvent pour faire résonner l'un des harmoniques, tel que le septième, le neuvième, le onzième ou le treizième. Fort heureusement, lorsque ce fait se produit, la résistance du circuit, pour le courant de cette fréquence, est beaucoup plus grande que pour la fréquence fondamentale, en sorte que la tension aux bornes de la capacité ou de la self-induction n'atteint pas une valeur aussi grande que celle à laquelle on pourrait s'attendre *a priori*. Cela tient surtout à ce que nos circuits de machines sont enroulés sur du fer, et que ce fer, bien que feuilleté, est le siège de courants de Foucault qui deviennent très importants aux hautes fréquences et réagissent sur les circuits en introduisant des forces contre-électromotrices, comme feraient des résistances.

Je n'ai pas le temps de m'étendre sur ce sujet; mais, quoi qu'il en soit, nous avons intérêt à produire des forces électro-motrices sans harmoniques autant que possible.

Les harmoniques peuvent avoir deux origines différentes. Ils peuvent provenir, d'abord, de la forme des pôles, de leur étendue relativement au pas polaire, et des dimensions relatives des pôles et des bobines de l'induit; les grandeurs relatives de ces différents éléments interviennent pour modifier la forme de la courbe de la force électromotrice.

La seconde origine des harmoniques est dans la denture des induits.

Les harmoniques sont ordinairement de fréquence assez basse, quand ils viennent de la forme des pôles. Les alternateurs homopolaires, dont je vous ai montré un spécimen au début de cette conférence, ont cette propriété que, dans certains cas, ils peuvent donner des termes pairs de la série de Fourier; mais, en général, avec des

bobines induites convenables, il n'y a que des termes impairs provenant de la forme des pôles. Le troisième est le plus dangereux. Il disparaît avec des proportions convenables. Il est bon d'ailleurs de noter que les deux couplages que l'on peut faire en triphasé, le couplage en étoile et le couplage en triangle, ont pour effet de détruire les harmoniques multiples de 3 : 3, 6, 9, etc... En résumé, ces harmoniques sont faciles à éviter.

Il n'en est pas toujours de même de ceux de denture. Les harmoniques de denture viennent de ce que la résistance magnétique change par le passage des dents devant les pôles. Il n'y a pas constamment le même nombre de dents servant au passage du flux lors de sa pénétration dans l'induit, d'où une variation de flux rapide dans la bobine induite et production d'harmoniques. Si n est le nombre de trous, ou de dents, par paire de pôles, il y a production d'un harmonique de rang n, mais d'amplitude variable pendant la période, c'est-à-dire de la forme $\sin \omega t \sin n\omega t$, qui est équivalent analytiquement à deux harmoniques de rang $(n + 1)$ et $(n - 1)$ en vertu de l'égalité :

$$\sin \omega t \sin n\,\omega t = \frac{1}{2} \cos (n - 1)\,\omega t - \frac{1}{2} \cos (n + 1)\,\omega t.$$

Pour éviter ou réduire au moins ces harmoniques de denture, on peut employer plusieurs artifices. On arrondit les épanouissements polaires de façon que l'entrée sous le pôle soit plus douce et que la variation de flux qui en résulte soit moins forte. D'autres fois, on incline le bord du pôle par rapport aux encoches, ce qui produit un résultat analogue. D'autres fois encore, on incline les encoches, le bord du pôle restant parallèle à l'axe de rotation.

Ces moyens sont insuffisants quand l'entrefer n'est pas grand et quand la denture est saturée. Je crois d'ailleurs qu'aucun moyen n'est parfait dans ce cas ; celui consistant à placer sur l'inducteur une cage d'écureuil plus ou moins résistante ne peut avoir qu'une efficacité également incomplète, pour cette raison qu'autour des conducteurs de l'induit existe toujours un certain flux de dispersion. Quoi qu'on fasse, on ne peut pas obtenir que le flux de dispersion n'existe pas. Par conséquent il restera toujours quelque chose des harmoniques, des harmoniques de denture en particulier, et de ceux ayant une autre provenance également.

Ce quelque chose, d'ailleurs, n'est pas très important. On peut,

même avec des dents droites, qui donnent naissance aux plus forts harmoniques, et les artifices ordinaires, avoir pour ceux-ci une amplitude ne dépassant pas 3 ou 4 0/0 du terme fondamental. Il y a loin de ce résultat à ceux que l'on constate dans certaines machines, déjà anciennes d'ailleurs, et dont les harmoniques valent 20 ou 30 centièmes du terme fondamental. On peut se contenter de cela, et les courants de Foucault se chargent du reste.

Je ne terminerai pas cette partie sans dire combien les appareils permettant de relever rapidement les courbes des forces électromotrices, tels que l'oscillographe Blondel, le rhéographe Abraham, l'ondographe Hospitalier, ont été utiles aux électriciens pour ces études.

De même qu'une pile non polarisable est suffisamment définie par sa force électromotrice et l'intensité qu'elle donne en court-circuit, de même un alternateur est suffisamment défini en première approximation, quand on connaît avec sa fréquence sa force électromotrice efficace et l'intensité efficace qu'il débite en court-circuit.

Par là nous entendons la force électromotrice et l'intensité dans un des circuits de l'induit, les autres étant supposés placés dans les mêmes conditions ; il est inutile de compliquer les choses en considérant chaque fois tous les circuits de l'induit.

Alors que, dans la pile, le courant de court-circuit est limité par la résistance intérieure, ici c'est presque seule la self-induction qui le limite.

Mais, lorsqu'on achète un alternateur, ce n'est pas pour le mettre en court-circuit. Aussi demande-t-on qu'il soit capable de fournir une certaine tension et un certain courant décalés l'un par rapport à l'autre d'un angle φ défini par son cosinus. Cette valeur de l'angle φ n'est pas indifférente. Je vous demande d'ouvrir ici une parenthèse pour ceux qui ne sont pas très au courant de la technique des courants alternatifs.

Généralement un appareil récepteur quelconque absorbe un courant $i \sin(\omega t - \varphi)$ décalé, en retard, d'un angle φ sur la différence de potentiel aux bornes $e \sin \omega t$, que cet appareil soit un moteur, une lampe, une ligne même.

Pour la commodité du langage, on a l'habitude de décomposer ce courant en deux autres en vertu de l'égalité :

$$i \sin(\omega t - \varphi) = [i \cos \varphi] \sin \omega t - [i \sin \varphi] \cos \omega t.$$

La première composante de ce courant, $i \cos \varphi$, qui est en phase avec la différence de potentiel, s'appelle courant watté ; la seconde, composante $i \sin \varphi$, qui est en quadrature, en retard de 90°, s'appelle courant déwatté ou magnétisant.

En multipliant chacun de ces courants par la différence de potentiel, on obtient parallèlement la puissance réelle et la puissance magnétisante. En y regardant de près, on constate que la puissance réelle se retrouve toujours sous forme de puissance mécanique. chaleur, ou nouvelle puissance réelle, et que la puissance magnétisante sert, en réalité, à la magnétisation de l'appareil, ou, si elle ne sert pas entièrement à la magnétisation de l'appareil, se retrouve sous forme de nouvelle puissance magnétisante.

On démontre aisément que, de même que pour la puissance réelle, il y a, dans un réseau, conservation de la puissance magnétisante, c'est-à-dire que l'alternateur doit produire la somme des puissances magnétisantes absorbées par tous les appareils du réseau : lampes, moteurs, lignes, etc. Cette puissance magnétisante que l'alternateur doit produire est évidemment, pour lui, *démagnétisante ;* plus $\sin \varphi$ est grand ou $\cos \varphi$ petit, plus l'alternateur se trouve démagnétisé par le courant qu'il débite, à égalité d'*intensité*.

Cela se voit très bien, physiquement, de la façon suivante : dans un appareil d'induction quelconque, la force électromotrice est la dérivée changée de signe du flux par rapport au temps. Si le flux est sinus, par exemple, la force électromotrice est — cosinus ; elle est en retard d'un quart de période sur le flux. Si le courant issu de cette force électromotrice est lui-même en retard d'un quart de période sur elle, il est en retard d'une demi-période sur le flux, c'est-à-dire qu'il est en opposition avec lui, donc *démagnétisant*. Le courant déwatté, en retard, est démagnétisant pour l'appareil qui le debite. Au contraire, si le courant débité est en avance sur la force électromotrice d'un quart de période, il est en phase avec le flux, donc *surmagnétisant ;* il tend à augmenter le flux dans l'appareil. C'est ce qui arrive si l'alternateur débite sur une capacité.

On peut, en effet, réaliser des alternateurs dans lesquels le champ soit entièrement produit par les courants débités dans des condensateurs. J'ai eu le plaisir de montrer une telle machine (*Projection, fig.* 2) à quelques-uns d'entre vous, il y a une dizaine d'années, lorsque la Société de Physique est venue visiter les Établissements Weyher et Richemond. Cette machine produisait des courants alter-

natifs entièrement en l'absence de courants continus, rien que par les courants qu'elle débitait elle-même dans la capacité que voici. Comme vous pouvez en juger, la caisse de condensateurs était très importante par rapport à l'alternateur; c'est pour cela que cette machine n'est pas devenue industrielle. Simple question de prix.

Fig. 2. — Alternateur excité par condensateurs.

Mais cette machine n'était pas un joujou; elle a donné pendant trois jours 18 kilowatts sous une tension de 1.000 volts. On pourrait donc, n'était le prix, faire des machines de ce genre. On pourrait même, chose curieuse, réaliser ainsi les mêmes modes d'excitation qu'avec le courant continu : shunt, série, compound. Mais il n'y en a pas d'application pratique. Et si je vous en ai parlé, c'est uniquement pour vous montrer l'importance considérable du décalage des courants produits par la machine.

On pourrait donc définir commercialement un alternateur par sa tension, son courant et son cos φ. Mais vous allez voir que cela ne suffit pas et qu'il faut y joindre, soit son courant en court-circuit avec l'excitation donnant la tension normale à vide, soit sa chute de tension, lorsque, étant excité à vide, on lui fait produire son plein courant avec le cos φ spécifié.

Prenons deux alternateurs identiques en nous réservant seulement de faire différer les quantités de cuivre sur les induits et les entrefers. Seules, les excitations en charge devront être les mêmes, si l'on veut que les échauffements des inducteurs soient les mêmes. La machine à petit entrefer exigera à vide une plus faible excitation que l'autre. A égalité de débit et de cos φ, l'excitation de la machine à faible entrefer restera toujours plus faible que l'autre, en sorte que, pour arriver à l'égalité des excitations dans les deux machines, il faudra charger plus la machine au petit entrefer que l'autre. Pour que l'échauffement de l'induit n'en soit pas plus grand, il suffira d'y mettre un peu plus de cuivre.

Moyennant une faible dépense supplémentaire, une machine à petit entrefer peut donc être vendue pour une plus grande puissance, si l'on ne spécifie pas autre chose que la puissance, le cos φ et l'échauffement.

Mais excitons nos deux alternateurs pour qu'ils donnent la tension normale à vide et mettons-les en court-circuit ; l'alternateur à faible entrefer donnera un courant de court-circuit plus faible que l'autre. Bien plus, si nous considérons le rapport k entre le courant en court-circuit et le courant normal de la machine, ce rapport sera encore plus petit pour la machine à faible entrefer, puisque, d'une part, son courant de court-circuit est plus petit, et que, d'autre part, son courant normal est plus grand.

De là, donc, un premier moyen pour différencier deux machines qui, en apparence, peuvent faire la même production : déterminer le rapport k entre le courant de court-circuit et le courant normal. Les machines dans lesquelles le rapport k est petit (1 ou 1 1/2) sont dites à grande réaction. Les machines dans lesquelles le rapport k est grand (4 ou 5) sont dites à faible réaction.

Sans aller jusqu'à mettre en court-circuit les deux machines que nous avons comparées tout à l'heure, on peut, étant excitées à vide, leur faire débiter leur plein courant, sans changer l'excitation : la machine à faible entrefer aura une chute de tension plus grande que l'autre. De là un autre moyen plus souvent employé pour différencier deux machines capables de la même production : déterminer la chute de tension.

Dans les applications électrochimiques, on recherche les fortes chutes de tension, parce que des courts-circuits se produisant fréquemment dans les fours, et pouvant durer parfois un temps appré-

ciable, il ne faut pas qu'il en résulte de détérioration de la machine. Je dois vous dire en effet que, dans l'essai en court-circuit d'une machine à faible réaction, on s'arrange pour ne pas dépasser une fois et demie ou deux fois le courant normal, pour ne rien détériorer, et l'on extrapole, ayant affaire à une fonction franchement linéaire.

Dans les distributions mixtes, d'éclairage et de force motrice, on a intérêt au contraire à avoir des alternateurs à faible chute de tension, de façon que le démarrage ou la surcharge d'un moteur n'influent pas sensiblement sur la tension que reçoivent les lampes; autrement les lampes varient d'éclat, et leur durée se trouve très réduite par les variations de voltage.

Il y a une autre circonstance qui contribue à la chute de tension avec la charge et dont on ne s'occupe pas assez souvent, c'est la diminution de vitesse qui accompagne l'augmentation de charge : la vitesse diminuant, la force électromotrice de l'excitatrice diminue, de sorte que l'excitation de l'alternateur diminue et sa tension diminue plus encore.

Si, pour une diminution de vitesse de 1 0/0, la tension de la machine excitatrice diminue de 2 0/0, la tension de l'alternateur diminue de 3 0/0. Cette *variation cinétique* est, dans les meilleures conditions, triple de la variation de vitesse; elle est quelquefois plus grande. Nous verrons que, pour un bon couplage en parallèle, la diminution totale de vitesse doit être d'environ 5 0/0. Il en résulte une baisse de tension de 15 0/0 qui s'ajoute à la chute de tension due au débit, chute qui est toujours spécifiée à vitesse constante. Cette variation cinétique peut être déterminée avant construction par des moyens très simples, quand on a calculé les caractéristiques de l'alternateur et de l'excitatrice.

La prédétermination des caractéristiques à vide et en charge de l'alternateur avec un cosinus φ quelconque se fait aujourd'hui avec une précision très suffisante en pratique. De nombreuses méthodes ont été imaginées à cet effet, particulièrement par M. Potier, M. Blondel, M. Picou, M. Guilbert, etc... J'emploie personnellement la méthode de M. Potier, qui m'a toujours donné pleine satisfaction dans quelques dizaines d'applications où j'ai eu l'occasion de m'en servir. Je voudrais pouvoir développer cette méthode ce soir et apporter ainsi un faible témoignage de reconnaissance à l'homme dont l'intelligence et le caractère faisaient l'admiration de tous; mais le temps me manque absolument.

Nous arrivons maintenant à la grosse question du couplage en parallèle des alternateurs.

Comme l'a très bien dit M. Janet, il n'y aurait pas eu de régulateur mécanique assez précis pour maintenir le synchronisme de deux alternateurs couplés, s'il n'avait trouvé sa réalisation dans les propriétés mêmes des alternateurs. Il faut songer en effet que, dans une journée environ, deux alternateurs couplés doivent faire rigoureusement 4 millions de périodes tous les deux, sans que l'un fasse une période de plus que l'autre. Cela se produit tout naturellement, parce que deux alternateurs couplés électriquement sont comme reliés mécaniquement par un accouplement élastique. Tant que l'accouplement élastique ne casse pas, les machines se maintiennent en synchronisme. Mais il casse quelquefois, et c'est ce qu'il faut éviter, ce qu'on appelle le *décrochage* étant très dangereux à plusieurs points de vue. Il faut avoir vu se produire un décrochage dans une usine importante pour se rendre compte de ce que cela peut être : lorsque les machines se décrochent, l'obscurité succède à la lumière, les alternateurs se mettent à hurler, les machines à vapeur grognent; on entend de tous côtés des coups produits par des pièces mécaniques travaillant anormalement ; les fils fusibles sautent avec des bruits comparables à des coups de pistolet, emplissant l'atmosphère des fumées de plomb et de cuivre produites par les arcs dans les coupe-circuits; on se croirait avec toutes les bêtes d'Ezéchiel. C'est très dangereux, parce qu'il peut se produire des ruptures de pièces mécaniques, et que certains ouvriers perdent pour longtemps l'assurance dont ils ont besoin pour bien conduire le matériel.

Si p est le nombre de paires de pôles, l'accouplement ne casse pas, tant que l'angle que font deux points identiques des deux machines ne dépasse pas environ $\frac{90^\circ}{p}$.

Mais il ne suffit pas d'éviter le décrochage, il faut encore que, lorsque cet angle varie périodiquement pour une cause quelconque, la tension aux bornes ne varie que d'une manière insensible. On trouve alors que, pour une variation de tension de 1 1/2 0/0, l'angle ne doit pas dépasser $\frac{20^\circ}{p}$, c'est-à-dire, par exemple, 1° pour deux machines ayant 40 pôles. Cette variation de tension de 1 1/2 0/0 commence à être sensible sur des lampes à incandescence, quand elle est rythmée.

On a intérêt, pour simplifier l'étude des couplages, à considérer non pas deux alternateurs identiques, mais un alternateur couplé avec un réseau, lequel peut être symbolisé par un autre alternateur infiniment grand et de vitesse, ou fréquence, rigoureusement constante. Les formules sont les mêmes, mais l'esprit est débarrassé d'une sujétion ; l'angle en question, l'*écart angulaire*, doit alors être réduit de moitié, $\frac{10^\circ}{p}$, puisque la machine idéale occupe la position moyenne entre les deux machines considérées tout d'abord.

Un alternateur couplé sur un réseau constitue donc un système en équilibre stable qui, *a priori*, doit jouir de toutes les propriétés des systèmes physiques analogues et, plus particulièrement, doit donner lieu aux phénomènes de résonance.

C'est en effet ce qui se vérifie. Mais il ne faudrait pas croire que les idées des électriciens aient toujours été aussi nettes qu'elles le sont aujourd'hui à cet égard. Si vous voulez bien en effet tenir compte de ce que ce système en équilibre tourne en même temps, ce qui empêche de voir exactement ce qui se passe expérimentalement et modifie d'ailleurs parfois considérablement la forme des équations, comme vous verrez tout à l'heure ; si vous voulez tenir compte ensuite de ce fait qu'il peut se produire des oscillations de trois natures différentes : des oscillations libres, des oscillations forcées dues au couple moteur et des oscillations dues à l'ensemble du système complexe formé par le groupe et son régulateur de vitesse ; si vous voulez tenir compte enfin de ce que l'amortissement, qui est toujours positif dans les systèmes physiques ordinaires, peut être parfois négatif ici, vous reconnaîtrez que les phénomènes ont dû se présenter dès l'abord sous une apparence plutôt rébarbative, et que, s'il est facile aujourd'hui d'en faire l'exposition ou l'enseignement avec simplicité, cela ne doit pas faire oublier toute la peine qu'il a fallu se donner pour arriver à ce résultat.

Le couple élastique C_s, c'est-à-dire le couple qui tend à ramener l'alternateur en coïncidence de phase avec le réseau quand l'écart angulaire est d'un radiant, est donné, à vide, par la formule suivante :

$$C_s = C_N p k,$$

C_N étant le couple en charge, p et k ayant été définis précédemment.

En charge, ce couple synchronisant est un peu différent, mais je ne peux pas insister sur ce point, je n'en ai pas le temps.

La pulsation propre de l'alternateur couplé, c'est-à-dire le rapport de 2π à la période, est :

$$\alpha_a = \frac{2\pi}{\mathfrak{T}_a} = \sqrt{\frac{C_s}{J}},$$

J étant le moment d'inertie de la partie tournante.

Ceci posé, supposons d'abord que nous puissions négliger la variation du couple moteur dans un tour et les perturbations venant du régulateur ; si l'on écarte l'alternateur de sa position d'équilibre, il y revient après une série d'oscillations de pulsation voisine de α_a, quand l'amortissement est faible.

Quelle cause peut écarter l'alternateur de sa position d'équilibre ? Il y en a plusieurs. La plus importante est un changement brusque dans l'admission de la vapeur dans la machine. Il peut arriver que la machine à vapeur, si bien qu'elle soit faite, donne lieu de temps à autre à une cylindrée de vapeur différente de la précédente, ce qui correspond à une impulsion communiquée au système. Il faut que l'élongation qui résulte de cet apport d'énergie W_e ne dépasse pas une valeur convenable : $\frac{45^\circ}{p}$, pour éviter le décrochage, et même moins, si l'on ne veut pas en sentir les effets sur la lumière. C'est ici qu'on voit l'influence de la rotation. Si la machine ne tournait pas, l'élongation serait indépendante de l'inertie ; elle serait :

$$\theta_m = \sqrt{\frac{2W_e}{C_s}}.$$

En effet, l'élongation d'un balistique qui est dépendante de l'inertie, quand on envisage la quantité de mouvement appliquée au système, est indépendante quand on envisage l'énergie introduite dans le système. Mais, si le balistique est en même temps en rotation et contient une quantité d'énergie emmagasinée

$$W = \frac{1}{2} J\Omega_m^2$$

(Ω_m étant la vitesse angulaire moyenne), l'élongation n'est pas indépendante de W. Lorsque W_e est petit devant W, et c'est le cas ici,

cette élongation est approximativement :

$$\theta_m = \frac{W_e}{\sqrt{2WC_s}}.$$

en négligeant l'influence de l'amortissement.

L'élongation est donc limitée par l'inertie de la machine et par le couple élastique, qui doivent avoir tous deux une valeur convenable.

J'ai dit tout à l'heure que l'alternateur revient à sa position d'équilibre lorsque, sous l'influence d'une pulsation brusque, il en a été écarté. Il n'y revient pas toujours. Il y a des alternateurs qui, au moment où on les couple — il y a toujours là une élongation — donnent lieu à des oscillations qui s'amplifient indéfiniment jusqu'au décrochage.

Dans ces alternateurs, l'amortissement est *négatif*. La cause de cet amortissement négatif n'est pas encore bien connue ; cependant il y a tout lieu de croire, à l'heure actuelle, qu'il est dû à l'hystérésis de l'induit.

Généralement, l'amortissement est positif. Voici d'où vient cet amortissement.

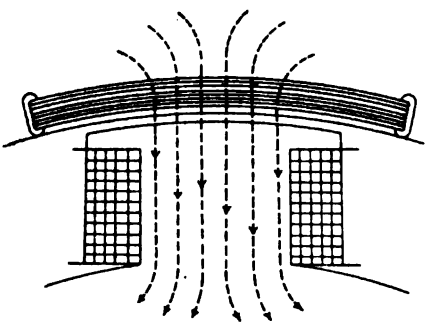


Fig. 3. — Flux antagoniste d'un alternateur débitant des courants déwattés.

Supposons un alternateur débitant du courant déwatté ; l'inducteur tourne par rapport à l'induit, qui est le siège de courants alternatifs. On se fait une idée assez exacte de l'influence réciproque de ces deux parties en supposant (*fig.* 3) qu'elles sont fixes toutes deux et qu'une bobine induite telle que celle représentée est parcourue par du courant continu. Le flux induit est alors celui représenté en pointillé, c'est un flux *antagoniste*.

Mais, si nous supposons que l'inducteur oscille autour d'une position moyenne, il en résulte des variations de ce flux antagoniste dans les pôles. Ces variations de flux produisent dans la bobine inductrice une force électromotrice. Cette bobine est presque en court-circuit, car l'ensemble des bobines inductrices est fermé sur l'excitatrice, dont la résistance intérieure et la self-induction sont complètement négligeables en regard de la résistance et self-induction des inducteurs.

La force électromotrice induite dans la bobine y produit donc un courant alternatif de fréquence égale à celle des oscillations, et de grande intensité, qui réagit sur la bobine de l'induit. Un certain amortissement se produit en vertu de la loi de Lentz.

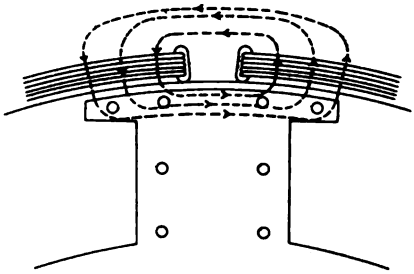


Fig. 4. — Flux transversal d'un alternateur débitant des courants wattés.

Le courant watté produit au contraire un flux transversal tel que celui représenté en *fig.* 4, qui ne passe pas à travers la bobine inductrice. Mais, si le pôle est plein, les oscillations y développent des courants de Foucault qui s'opposent encore au mouvement, moins énergiquement cependant que dans le cas précédent, la résistivité du fer étant plus grande. Si le pôle est feuilleté, il semble qu'il n'y ait plus d'amortissement pour le courant watté ; mais, comme il faut assembler les tôles constituant ce pôle au moyen de rivets ou boulons tels que ceux figurés, il se forme encore des courants amortisseurs très énergiques.

Dans le but d'avoir toujours un amortissement énergique, M. Leblanc a imaginé de placer dans l'inducteur ce qu'il a appelé un *amortisseur* (*fig.* 5). Les masses polaires sont percées de trous comme il est indiqué; dans ces trous passent des barres de cuivre, et de chaque côté, à chaque extrémité, ces barres de cuivre sont soudées à un cercle de cuivre. Les flux traversent ainsi des circuits peu

résistants, et l'amortissement ainsi obtenu est, d'après l'auteur, plus énergique que celui obtenu même avec des pôles pleins.

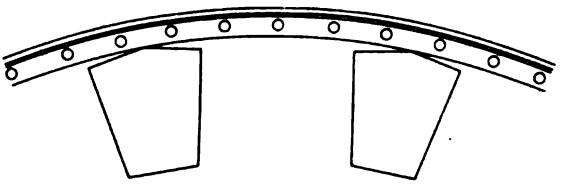


Fig. 5. — Disposition d'un amortisseur Leblanc.

Cet amortisseur a été l'objet de beaucoup d'applications, surtout en Allemagne et aux États-Unis : en Allemagne pour les alternateurs, et aux États-Unis pour les commutatrices, qui sont des alternateurs sous une forme différente.

Fig. 6. — Alternateurs munis d'amortisseurs Leblanc.

Voici (*Projection*) (*fig.* 6) une photographie de deux alternateurs munis d'amortisseurs Leblanc.

L'amortissement a pour effet de réduire non seulement les élongations dont nous avons parlé tout à l'heure, mais les oscillations forcées auxquelles nous arrivons maintenant.

Considérons un moteur à vapeur à pistons avec son couple variable

pendant un tour, mais en supposant encore qu'il n'y ait pas de régulateur de vitesse ; ce couple peut être exprimé en série de Fourier. En faisant l'analyse sur un grand nombre de machines, on trouve que cette série de Fourier comprend toujours comme terme fondamental celui qui correspond à la rotation de la machine. Si la vitesse angulaire de rotation de la machine est Ω_m, le terme fondamental est en sin $(\Omega_m t + \psi_1)$.

L'analyse montre encore que les machines monocylindriques donnent lieu à des variations du couple plus grandes que les machines polycylindriques, ce qui se comprend bien.

On peut résumer ces analyses en disant :

La série contient : le couple moyen C_m, plus des termes harmoniques qui, rapportés à C_m, ont pour valeur environ :

	Rang	Demi-charge	Pleine charge
Machine monocylindrique	1	0,12	0,14
— —	2	0,9	0,9
— —	3	0,12	0,11
— —	4	0,4	0,11
Machine polycylindrique	1	0,1	0,1
— —	2	0,5	0,2
— —	3	0,35	0,15
— —	4	0,4	0,4

Une première remarque est importante à faire : c'est qu'il y a des termes impairs. *A priori*, une machine à un piston devrait donner deux variations du couple par tour, une variation par coup de piston.

C'est en effet ainsi, mais il y a, en plus, une impulsion par tour ayant son origine dans la dissymétrie du couple moteur, dissymétrie provenant de l'obliquité de la bielle sur la tige du piston. Il est facile de voir, en considérant deux positions de la manivelle à 180° l'une de l'autre, que, pour la même pression dans le cylindre, les couples correspondants ne sont pas égaux. En résumé, tous les termes impairs de la série de Fourier proviennent de l'obliquité de la bielle sur le piston, et tous les termes pairs proviennent des coups de piston.

Quelques auteurs ont cru pouvoir négliger l'influence du premier terme de la série : c'est celui qui est le plus dangereux. En effet, ce qui nous intéresse directement, c'est l'écart angulaire. Or, dans la double intégration qu'il faut faire pour passer du couple à l'écart angulaire, chacun des couples harmoniques est divisé par le carré du

rang n^2. Déjà l'écart angulaire résultant du premier terme, pour le groupe isolé, est presque du même ordre de grandeur que celui résultant du second terme. Mais, si l'on considère l'accroissement qui résulte, pour chacun de ces termes, du couplage en parallèle, on constate que c'est presque le premier terme seul qu'il faut considérer.

En effet, par suite du couplage de l'alternateur sur le réseau, l'écart angulaire pour chacun des termes de la série se trouve multiplié par un coefficient σ_n donné par la formule :

$$\sigma_n = \frac{W}{W - W_n},$$

W_n étant lui-même défini par :

$$W_n = \frac{C_s}{2n^2}.$$

Pour le premier terme en particulier, W_n se réduit à :

$$W_n = \frac{C_s}{2}.$$

Le couplage a donc pour effet d'augmenter la grandeur de l'écart angulaire produit par la machine à vapeur considérée isolément, puisque σ est toujours plus grand que 1.

En *fig.* 7 est tracée la courbe de σ en fonction de W, qui est évidemment une hyperbole équilatère, pour le premier harmonique par exemple. L'unité adoptée en abscisses est le volant de *résonance* W_r, autrement dit le volant W_n pour $n = 1$ [1].

En poussant la discussion à fond, on reconnaît qu'il ne faut pas songer à marcher avec un volant compris entre W_r et W_2; non pas que cela soit impossible : c'est simplement imprudent.

On est ainsi conduit pratiquement à faire $W > W_r$, et l'on constate alors une faible augmentation des harmoniques autres que le premier.

Si l'on adopte un volant égal à deux fois le volant de résonance, σ est égal à 2 pour le premier terme : le premier terme se trouve doublé par le couplage. Quant au deuxième terme, il n'est augmenté que de 14 0/0. Le troisième est augmenté de 6 0/0. Si l'on

[1] Sur la même figure sont tracées les courbes de σ avec amortissement très énergique dans deux cas extrêmes : $pk = 20$ et $pk = 160$.

adopte un volant plus léger, c'est encore pis : lorsque σ vaut 11 pour le premier terme, il n'est que 1,3 pour le second. Dans tous les cas, on peut laisser de côté tous les termes de la série de Fourier qui suivent le premier ; il suffit, en général, d'examiner le premier terme et de faire que σ soit faible pour ce premier terme.

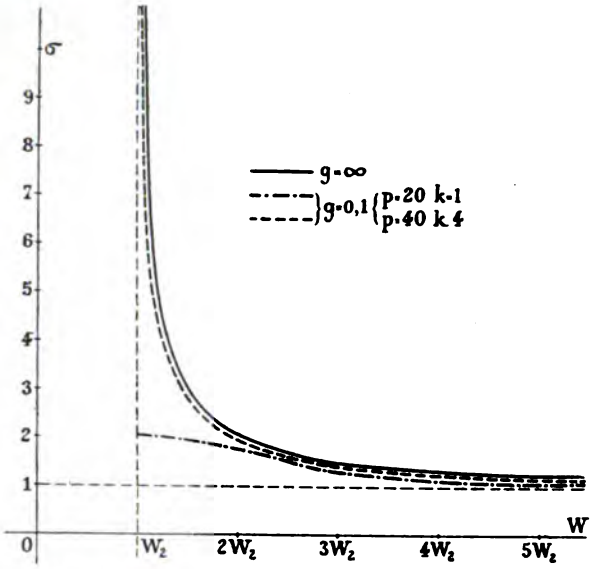


Fig. 7. — Accroissement de l'écart angulaire par le couplage en parallèle.

Si l'on tient compte de la variation de C_s avec la charge, on est conduit à adopter, pour les machines à vapeur, un volant minimum :

$$W = pC_N \frac{k+2}{2},$$

qui donne lieu à un écart $p\theta$ plus petit que 10° dans tous les cas. Mais, me direz-vous peut-être, pourquoi ne pas augmenter plus ce volant et le faire très lourd dans tous les cas pour s'éloigner franchement de la résonance?

D'abord parce que cela coûte : la fonte n'est pas chère ; mais il faut la payer tout de même. Ensuite parce qu'il y a quelquefois des inconvénients sérieux à avoir un volant trop lourd. J'y reviendrai tout à l'heure à propos des oscillations dues au régulateur de vitesse ; mais je puis faire remarquer déjà qu'un volant trop lourd

peut gêner beaucoup pour l'opération de la mise en parallèle. Un volant infini conduirait à une impossibilité de coupler sur un réseau : car il est impossible d'obtenir que la vitesse de la machine avant couplage soit exactement la vitesse voulue. Si le volant était infini, au moment du couplage la machine continuerait à tourner avec sa vitesse propre ; aucune force ne serait suffisante pour la ramener à la vitesse correspondant à la fréquence du réseau.

Un calcul simple montre qu'avec un volant dépassant 4 ou 5 fois le volant de résonance, on peut être très ennuyé quelquefois, lors de l'opération de la mise en parallèle...

Avant de passer à l'influence du régulateur de vitesse, je voudrais, pour ceux qui ne sont pas très au courant des phénomènes de résonance, insister sur ce fait de l'amplification de l'écart angulaire par le couplage, au moyen d'une image simple.

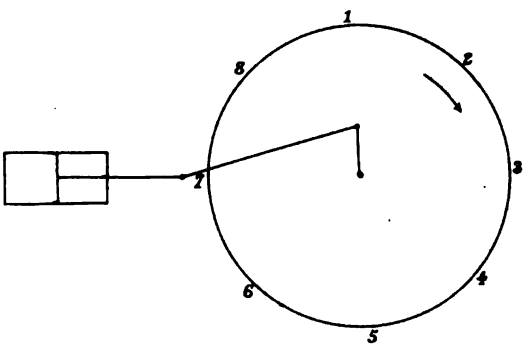


Fig. 8.

Nous avons vu que, pour les perturbations passagères, le couple élastique est limitatif des élongations produites. C'est, au contraire, ce couple élastique qui amplifie les oscillations quand les perturbations sont périodiques, étant donné que le volant est plus grand que le volant de résonance. Supposons une machine à vapeur monocylindrique (*fig.* 8) et, laissant de côté les termes impairs, considérons le deuxième terme seulement dû aux coups de piston. Le couple moteur est évidemment maximum quand le point A se trouve précisément dans la position 1, c'est-à-dire comme sur l'image. Il est nul dans la position 3. Il est de nouveau maximum dans la position 5, et nul dans la position 7.

Mais ce couple se compose de deux parties, le couple constant correspondant au travail produit et un couple alternatif. Ce couple alternatif est maximum et positif en 1, maximum et négatif en 3. La vitesse est en retard d'un quart de période sur le couple ; elle est donc maxima et positive en 2, et l'écart angulaire, étant en retard d'un quart de période sur la vitesse, est maximum et positif en 3.

Dans cette position 3, le couple élastique s'oppose donc au mouvement, il est négatif. Or précisément le couple alternatif est négatif aussi dans cette position. Le couple élastique ajoute donc son effet à celui du couple alternatif moteur : il est perturbateur au même titre que celui-ci.

On peut dire que, dans les phénomènes mécaniques ayant un caractère oscillatoire, l'élasticité peut être considérée comme une inertie négative, de même que, pour les courants alternatifs, la capacité peut être considérée comme une self-induction négative.

Nous avons jusqu'ici fait abstraction de l'influence du régulateur de vitesse ; mais cette influence est très grande, encore que peu précisée, ce qui résulte de ce que l'on a affaire à un ensemble très complexe. On est cependant d'accord sur quelques points principaux, en particulier sur la nécessité d'un *écart de réglage* assez grand.

Traçons (*fig.* 9) la courbe de la vitesse angulaire d'un moteur en fonction de la charge. Quand on charge, la vitesse décroît. On appelle écart de réglage la différence entre le nombre de tours que le moteur fait à vide et en charge, rapportée au nombre de tours en charge :

$$K = \frac{N_v - N_c}{N_c}.$$

Tout le monde est d'accord sur ce point, que l'écart angulaire doit être important. S'il était nul pour deux machines couplées, c'est-à-dire si la vitesse ne changeait pas du tout avec la charge, quelle raison y aurait-il pour que la charge de chaque machine soit définie?

Pour une même vitesse, toutes les charges seraient possibles dans chaque machine. La charge pourrait passer d'une machine à l'autre indifféremment. Il faut donc qu'il y ait une variation de vitesse avec la charge, et on a reconnu que cette variation de vitesse devait être de 4 à 5 0/0 au moins.

La considération d'une bonne répartition des charges conduit donc à l'adoption d'un grand écart de réglage. Il en est de même de la

théorie des oscillations dues au régulateur. J'ai déjà dit que cette question est très complexe.

Nous avons en effet en présence un groupe électrogène doué d'élasticité, d'inertie et d'amortissement, et un régulateur de vitesse également doué d'élasticité, d'inertie et d'amortissement, l'un réagissant sur l'autre avec un certain retard.

Je dois vous dire qu'il n'y a pas à cet égard de théorie qui ait reçu la sanction complète de l'expérience. Je vous demande cependant la permission de vous en exposer une qui, bien que relativement récente, est suffisamment d'accord avec les faits connus pour qu'elle vaille la peine d'être présentée à défaut d'une autre.

Il y a dans cette question une grandeur qui y joue un très grand rôle, c'est le *retard de distribution*. Supposez un groupe électrogène en train d'osciller ; le couple n'est pas maximum juste quand le régulateur se trouve dans la position inférieure, parce que le fluide met un certain temps à passer et à produire ses effets.

J'appelle retard de distribution le temps qui s'écoule entre le moment où l'index du régulateur est dans sa position inférieure et le moment où le couple moyen est maximum.

Même dans une machine monocylindrique, où on pourrait croire que le retard de distribution est nul, il ne l'est pas, parce que c'est au commencement de la course que se fait l'admission de la vapeur, tandis qu'elle agit pendant toute la course; il y a donc un retard de distribution d'environ un quart de tour.

Dans une machine polycylindrique, le retard de distribution est plus grand, puisque la vapeur agit successivement dans les cylindres en passant par les réservoirs intermédiaires ; il peut atteindre la durée d'un tour et demi.

Nous avons donc à considérer dans le problème :

La pulsation α_a de l'alternateur (et son volant), son amortissement ;

La pulsation α_r du régulateur et son amortissement, lequel, pour simplifier, nous supposerons égal à m fois l'amortissement critique, c'est-à-dire l'amortissement le plus faible avec lequel le système élastique revient à sa position d'équilibre sans la dépasser ;

Le retard de distribution ε_d ;

Enfin l'écart de réglage K_1, non plus l'écart moyen entre le vide et la charge, mais l'écart pour chaque charge, défini (*fig.* 9) par

$$K_1 = \frac{N_0 - N_2}{N_1}.$$

Nous laisserons de côté les variations du couple dans un tour.

Nous pouvons alors partir de cette hypothèse que le couple moteur, à un instant quelconque, a une certaine forme périodique: une constante plus un cosinus. De cette forme, nous déduisons les oscillations de la vitesse. Les oscillations de la vitesse permettent de déduire les oscillations dans la position de l'index, et les oscillations dans la position de l'index donnent de nouveau le couple moteur.

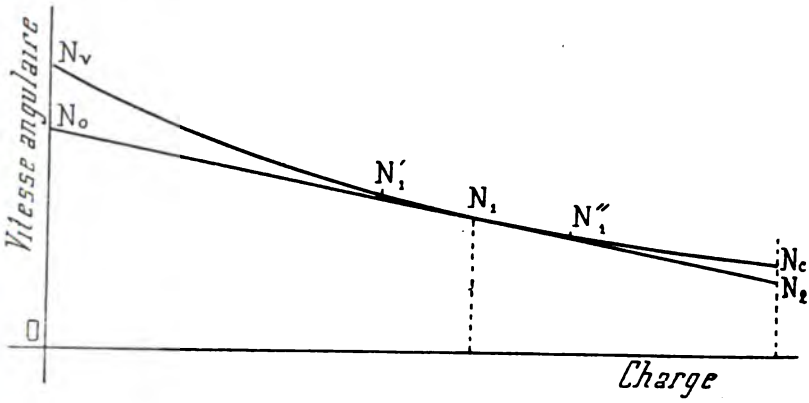


Fig. 9. — Écart de réglage d'un moteur.

Mais, si nous posions l'égalité de ces deux couples moteurs, nous écririons ainsi que le système se trouve dans des conditions telles que les oscillations continuent indéfiniment sans s'amplifier ni s'amortir, sans diverger ni converger, et c'est là un cas tout particulier qui ne se trouve presque jamais réalisé. Généralement, ces deux couples ne sont pas égaux; si le couple auquel on arrive en fin de calcul est plus grand que celui dont on est parti, les oscillations s'amplifient; dans le cas contraire, elles s'amortissent. Seulement il faut que ces deux couples soient en phase. L'égalité des phases entraîne une première équation que j'appelle relation de fréquence; l'inégalité des couples entraîne une deuxième inéquation que j'appelle: relation de convergence.

Ces deux relations permettent de discuter la question dans toute sa généralité. Elles montrent d'abord que, dans tous les cas, on évite d'autant mieux les oscillations que K_1 est plus grand.

Voyons d'abord à quoi elles conduisent pour un groupe isolé. La

relation de fréquence prend une forme très simple quand le groupe est isolé :

$$\operatorname{tg} \alpha\, \tau_d = \frac{1}{2m}\left(\frac{\alpha_r}{\alpha} - \frac{\alpha}{\alpha_r}\right),$$

où α est la pulsation $\frac{2\pi}{\tau}$ des oscillations qui se produisent.

Cette relation donne pour α en fonction de τ_d une série de courbes ; mais toutes ces courbes ne répondent pas à la réalité. Lorsque l'on cherche quelles valeurs de α satisfont aux conditions de signe, on s'aperçoit que la moitié des courbes disparaît.

Par exemple, pour $m = 1$ et $\alpha_r = 6{,}32$, il ne subsiste que les courbes portées en *fig.* 10.

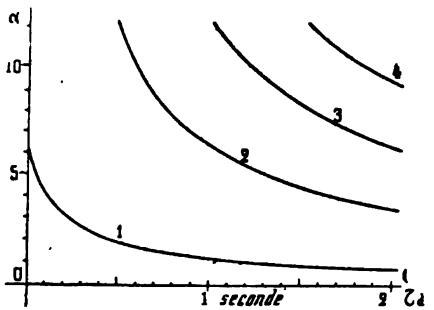


Fig. 10. — Fréquence des oscillations dues au régulateur pour un groupe isolé.

Si l'on se reporte ensuite à la relation de convergence, on reconnaît que les fréquences correspondant à la plus basse de ces courbes donneront plus facilement lieu à des oscillations divergentes ; c'est donc pour cette courbe seulement qu'il convient d'utiliser la relation de convergence.

Celle-ci conduit à la conclusion suivante :

Il faut adopter, pour un écart de réglage déterminé, un volant d'autant plus lourd que le retard de distribution est plus grand.

Maintenant, passons au groupe couplé. La relation de fréquence est la même, s'il n'y a pas d'amortissement dans l'alternateur.

En vérité, il ne faut pas admettre un amortissement complètement nul, mais très petit et positif. Quoique la relation de fréquence reste alors la même, si l'on cherche quelles valeurs de α satisfont aux conditions de signe, on trouve que les circonstances sont tout à fait changées. On s'aperçoit que, des courbes précédentes qu'il

fallait adopter pour l'alternateur isolé, il ne faut conserver que les parties supérieures, tant que $\alpha > \alpha_a$, et qu'au contraire, quand $\alpha < \alpha_a$, il faut prendre les parties inférieures des courbes qui ont dû être rejetées dans le cas précédent. Il faut, de plus, relier par des parties de la droite horizontale, $\alpha = \alpha_a$, les portions de courbes ainsi obtenues (*fig.* 11). En effet, quand $\alpha > \alpha_a$, l'influence de l'inertie domine, et les choses se passent comme si elle était seule ; quand $\alpha < \alpha_a$, l'élasticité domine, et les choses se passent comme si l'inertie était seule, mais négative.

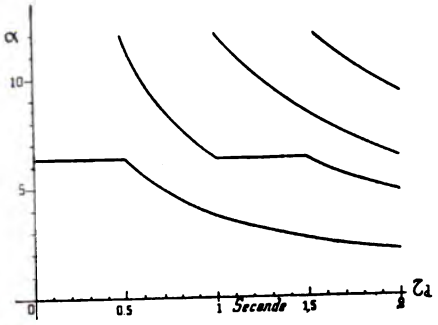


Fig. 11. — Fréquence des oscillations dues au régulateur pour un groupe couplé.

Vous savez que dans un système au voisinage de la résonance la phase passe assez brusquement de 0 à π pour de faibles variations de la fréquence, d'autant plus brusquement que l'amortissement est plus faible.

C'est ce qui fait qu'ici le retard de distribution peut changer brusquement d'une demi-seconde, sans que la fréquence des oscillations change de façon sensible.

Lorsque l'amortissement de l'alternateur est fort, la forme de ces courbes se trouve modifiée. Au lieu de se faire par des droites, le raccordement entre les courbes se fait par des lignes courbes et inclinées. Si l'amortissement est négatif, le raccordement, au lieu de se faire par les parties de droite représentées, se fait par les portions de la droite qui manquent justement ici.

Revenons à la *fig.* 11. Pour un retard de distribution compris entre 0 et 1/2 seconde, ou entre 1 et 1,5 seconde, la fréquence des oscillations qui se produisent (α) est égale à la fréquence propre d'oscillation de l'alternateur (α_a). Or la relation de convergence d un groupe couplé

sans amortissement contient en facteur $\left(1 - \frac{\alpha_a}{\alpha}\right)$; c'est-à-dire qu'il n'y a pas moyen de marcher théoriquement avec un amortissement tout à fait nul et des retards de distribution correspondant à ces valeurs. Heureusement, en pratique, il y a toujours un peu d'amortissement dans l'alternateur, et l'on peut, dans certains cas, marcher même dans les paliers dangereux. C'est difficile; il faut que l'amortissement du régulateur soit très grand pour arriver à satisfaire à la relation de convergence dans ces conditions ; cependant on peut y arriver encore quelquefois. Mais il vaut mieux éviter franchement les zones dangereuses en adoptant un retard de distribution compris dans les zones non dangereuses, ou en modifiant certaines conditions, comme la période du régulateur.

Voyons maintenant quelle peut être l'influence du volant sur les oscillations venant du régulateur.

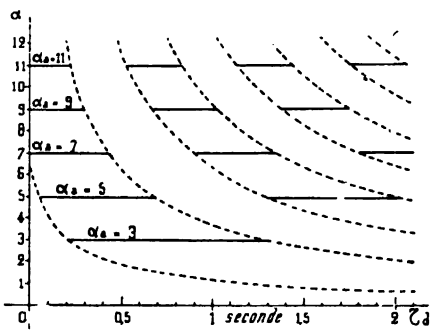


Fig. 12. — Influence du volant sur la fréquence des oscillations dues au régulateur pour un groupe couplé.

L'augmentation du volant a pour effet de faire descendre la ligne horizontale ($\alpha = \alpha_a$), sur laquelle se font les raccordements entre les courbes de α. Mais (*fig.* 12), en s'abaissant, les lignes de raccordement s'allongent; c'est-à-dire qu'en admettant un volant de plus en plus lourd, la région dangereuse s'étend de plus en plus en se portant vers la droite. Si la machine est à petit retard de distribution (monocylindrique, ou turbine), l'opération est avantageuse; si la machine est à grand retard de distribution (polycylindrique), l'opération est mauvaise. C'est pourquoi, en particulier, les Américains, qui abusent volontiers des grands volants, comme de bien des grandes choses,

ont été parfois dans l'impossibilité de marcher en parallèle à cause des oscillations des régulateurs.

Il ne me reste plus qu'à vous parler du compoundage des alternateurs.

Je vous expliquais tout à l'heure qu'il y a aux bornes d'un alternateur ordinaire des variations de tension dues à deux causes : la variation du débit et la variation de vitesse. Si, au lieu de considérer la tension aux bornes de l'alternateur, on considère celle à l'extrémité d'une ligne desservie par l'alternateur, ces variations sont encore plus grandes, puisque la chute en ligne est dans le même sens que la chute dans l'alternateur.

De là deux nécessités : 1° d'avoir des alternateurs à faible chute de tension et à faible variation cinétique quand la charge varie constamment ; 2° de corriger la variation de tension à la main en agissant sur l'excitation.

La première obligation entraîne, ainsi que vous avez vu, une dépense d'acquisition plus grande pour l'alternateur ; la seconde, une dépense de personnel. Quelques ingénieurs ont alors pensé qu'il serait intéressant de compounder les alternateurs comme on a fait pour les dynamos, de manière que la tension se maintienne constante et, au besoin, qu'elle augmente avec la charge.

L'idée d'agir sur l'excitation en fonction de la charge est très ancienne, mais les premières tentatives étaient grossièrement réalisées par des procédés barbares, et il n'y a que quelques années que l'on possède des solutions à peu près parfaites. Il convient de séparer ces solutions en deux classes : les compoundages purement physiques, dans lesquels les courants alternatifs débités agissent directement sur l'état magnétique de l'excitatrice, et les compoundages électromécaniques, dans lesquels le courant débité agit sur le rhéostat d'une excitatrice ordinaire par un procédé mécanique.

Voyons les premiers. Le courant débité étant alternatif et le courant d'excitation continu, il faut un intermédiaire entre les deux pour qu'ils agissent l'un sur l'autre, intermédiaire auquel on peut encore donner le nom d'excitatrice.

Pour une même intensité débitée, l'excitation devant augmenter plus lorsqu'elle est déwattée que lorsqu'elle est wattée, il faut que le système réalise de lui-même des variations d'excitation qui soient non seulement fonction du courant, mais aussi de sa phase. Enfin,

comme on ne peut pas obtenir un courant continu sans un collecteur, il faut encore que la position des balais sur ce collecteur reste invariable, quand le débit et le cos φ de l'alternateur varient.

Il faut, en outre, que l'excitation augmente plus que si la vitesse restait constante, puisque celle-ci diminue avec la charge ; cela est facile.

Ayant l'expérience de ces machines, j'ajouterai qu'on est presque toujours conduit à les réaliser avec hypercompoundage, malgré la diminution de vitesse en charge.

Je ne citerai que pour mémoire le compoundage de M. Leblanc : l'intermédiaire entre le courant alternatif et le courant continu est une commutatrice à deux induits. Ces deux induits reçoivent d'abord un seul enroulement continu ordinaire aboutissant à un collecteur. Chaque induit reçoit en outre un enroulement spécial, le premier qui se trouve placé en série dans le courant débité par l'alternateur, et le second alimenté par une dérivation prise sur l'induit de cet alternateur. M. Leblanc a réalisé une telle machine, à titre d'essai, et, d'après les résultats d'expériences fournis, elle a donné un compoundage très satisfaisant pour l'industrie. Mais, je ne sais pourquoi, il n'y a pas d'applications de ce système.

Dans mon procédé de compoundage, l'organe intermédiaire est une dynamo à enroulements sinusoïdaux (*Projection*, *fig.* 13). Le stator, ou partie fixe, a toute l'apparence d'un induit d'alternateur ou d'un stator de moteur à champ tournant. Ce stator reçoit des courants polyphasés, qui y produisent un champ tournant. Ce champ tourne avec une vitesse déterminée par le nombre de pôles de la machine.

Le rotor a tout à fait l'aspect extérieur d'un induit de dynamo à courant continu, mais possède deux enroulements dont les nombres de spires sont des fonctions sinus de l'angle de position sur l'induit. Par un rapport convenable entre la vitesse du champ et celle de l'induit et des positions convenables des balais, le courant recueilli sur le collecteur est continu.

Le nombre de pôles de l'excitatrice peut être différent de celui de l'alternateur, 1/2, 1/3 ou 1/4, ce qui permet la réalisation dans tous les cas sans engrenages pour les alternateurs tournant à plus de 150 ou 200 tours par minute.

Le stator étant isolé du rotor peut être alimenté directement par l'alternateur même pour les tensions élevées.

Enfin la variation convenable de l'excitation est obtenue par un

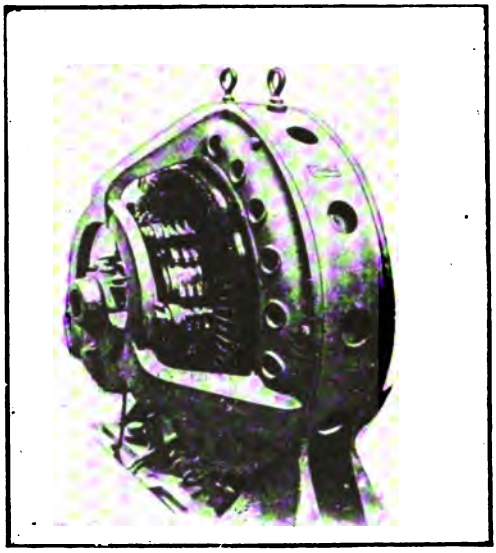


Fig. 13. — Dynamo excitatrice à enroulements sinusoïdaux.

transformateur de compoundage (*Projection*, *fig.* 14) monté selon le schéma de la *fig.* 15.

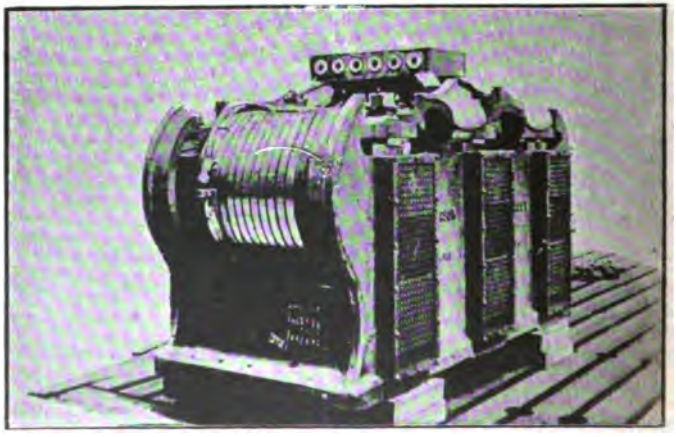


Fig. 14. — Transformateur de compoundage.

Ce système a reçu d'assez nombreuses applications. Il y a actuel-

lement 60 ou 70 alternateurs de ce type en fonctionnement courant.

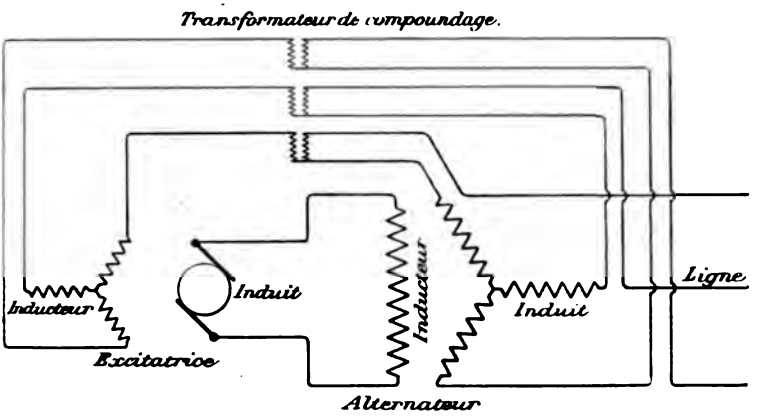


Fig. 15. — Schéma de montage des éléments d'un alternateur compound Boucherot.

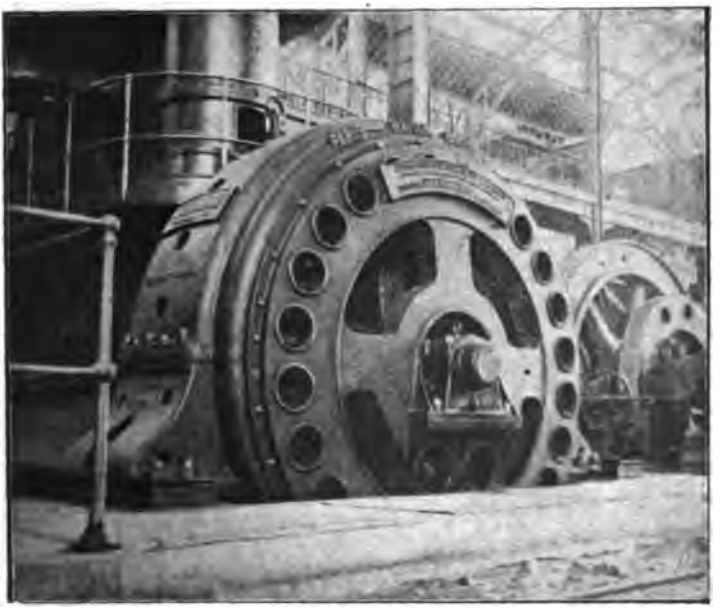


Fig. 16. — Alternateur-volant compound Boucherot de 850 kilovolt-ampères à 250 tours par minute. Excitatrice sur l'arbre, derrière.

Je vais vous en montrer quelques-uns (*Projections*) (Voir *fig.* 16, 17,

Fig. 17. — Alternateur compound pour turbines de Laval.
Groupe de 150 kilovolt-ampères à 1.000 tours par minute, même système.

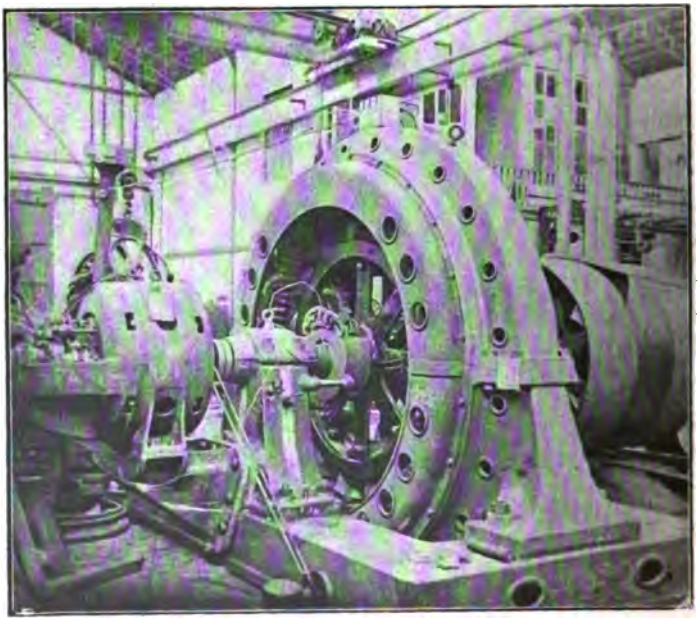


Fig. 18. — Alternateur compound formant partie d'un groupe de trois identiques, de 400 kilovolt-ampères à 315 tours par minute, même système.

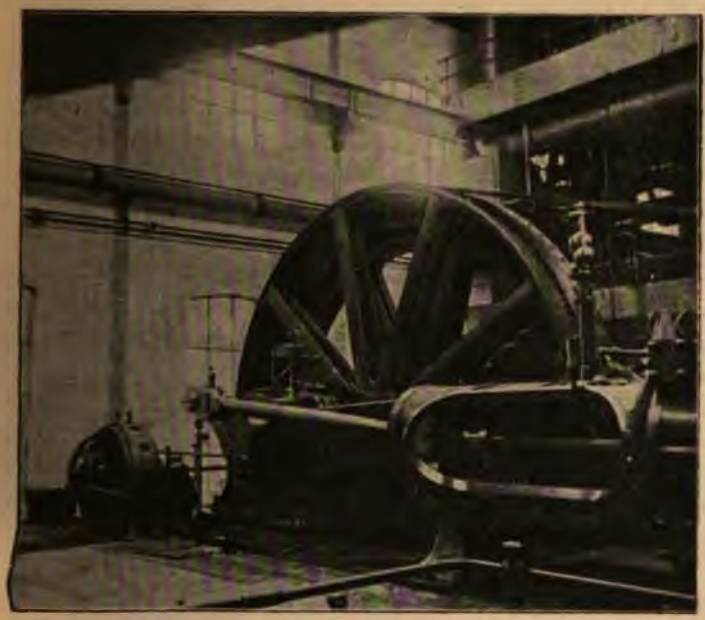


Fig. 19. — Alternateur-volant compound de 850 kilovolt-ampères- à 65 tours par minute, excitatrice mue par engrenages, même système.

Fig. 20. — Turbo-alternateur compound Boucherot de 600 kilovolt-ampères à 3.000 tours par minute.

18, 19, 20, alternateurs de diverses puissances à vitesses comprises entre 65 à 3.000 tours par minute).

Toutes ces machines sont construites par la maison Bréguet.

Je passe au compoundage de M. Blondel.

L'organe intermédiaire est une commutatrice E (*Projection, fig.* 21), dont l'inducteur reçoit une excitation constante de la part d'une petite dynamo auxiliaire E′ et une autre variable de ses balais, et dont l'induit, côté bagues, est relié au secondaire d'un transformateur dont le primaire est parcouru par le courant débité par l'alternateur A. L'induit, côté collecteur (droite), alimente les inducteurs de l'alternateur. Ce sont les variations dans l'intensité et la phase des courants passant par les bagues qui provoquent les variations voulues de la tension au collecteur.

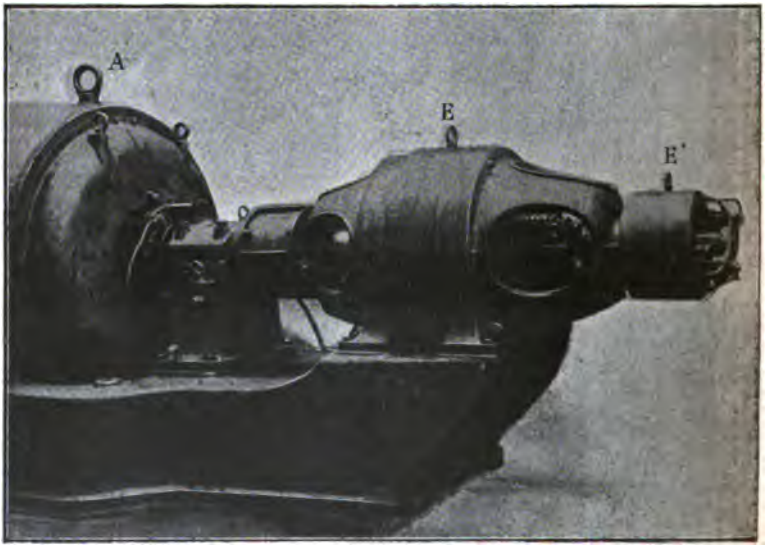


Fig. 21. — Alternateur compound Blondel de 500 kilovolt-ampères à 3.000 tours par minute.

L'application est faite ici à un turbo-alternateur donnant 500 kilovolt-ampères à 3.000 tours par minute.

Il y a, je crois, six ou sept applications de ce système, réalisées par la maison Sautter-Harlé.

Avec ces deux systèmes, je ne puis citer, comme ayant reçu des

applications, en France tout au moins, que celui d'Heyland, construit par la Société Alsacienne.

Dans ce dernier, il n'y a pas d'excitatrice, ce qui, pour un observateur superficiel, semble un avantage ; les bobines inductrices, divisées en un certain nombre d'éléments reliés à un collecteur, reçoivent ainsi des courants issus directement de l'induit de l'alternateur, ou, plus exactement, transformés de ceux-ci, et convenablement redressés par le système de balais et le collecteur.

Cette machine (*Projection*, *fig.* 22) est un alternateur de 75 kilovolt-ampères à 750 tours par minute.

Fig. 22. — Alternateur compound Heyland de 75 kilovolt-ampères à 750 tours par minute.

Cette autre (*Projection*), un alternateur-volant de 550 kilovolt-ampères à 80 tours par minute.

Il y a huit applications de ce système.

J'arrive maintenant aux compoundages dits électro-mécaniques.

Il n'y a pas d'applications de tels systèmes, et je ne vous en aurais pas parlé si M. Janet n'avait éveillé votre curiosité à cet égard.

M. Routin est un des premiers qui se soient occupés de la question. Il a commencé (*Projection*) par se servir du régulateur de vitesse pour modifier l'excitation dans l'alternateur. Mais on ne pouvait faire ainsi qu'un compoundage très imparfait, ne tenant pas compte du cos φ, et, naturellement, on ne pouvait songer à aller loin dans cette voie.

Aussi a-t-il modifié constamment ses dispositions. Voici, m'a-t-il dit, sa disposition définitive, qui date seulement du commencement de cette année ; il prévoit (*Projection*) :

1° Un compensateur électrique à servo-moteur agissant sur le régulateur en fonction de la puissance *ei* cos φ, de manière à maintenir la vitesse constante ;

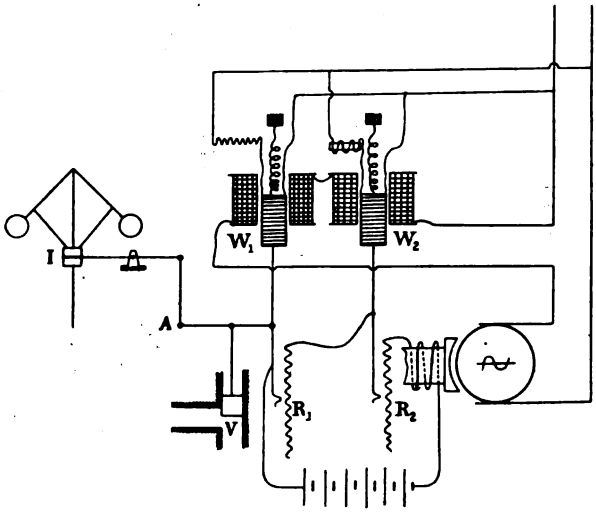


Fig. 23. — Compoundage électro-mécanique Picou.

2° Un modérateur tensimétrique à servo-moteur pourvu d'un compensateur agissant suivant les variations de charge, et d'un compensateur agissant suivant les variations du facteur de puissance.

M. Picou a indiqué dans le *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils* de 1903 plusieurs dispositions de compoundages électro-mécaniques.

Je résume ici la plus typique (*Projection*, *fig.* 23) :

On cherche aussi à maintenir la vitesse constante. Supposons cette première partie du problème résolue : l'index I du régulateur peut alors être considéré comme un point fixe, et l'articulation A' également. Un premier système électromagnétique W_1 (wattmètre), dont la partie fixe est parcourue par le courant principal, et la partie mobile par un courant dérivé, donne une force proportionnelle à *ei* cos φ utilisée : 1° à ouvrir l'admission V du fluide proportionnellement à la puissance ; 2° à manœuvrer un premier rhéostat R_1 agissant sur l'excitation de l'alternateur. Comme ce premier système n'agirait qu'en fonction du débit watté, un deuxième système électromagnétique W_2, dont le fil fin est en série avec une forte self-induction, donne une force proportionnelle à *ei* sin φ, utilisée à manœuvrer un deuxième rhéostat R_2 agissant sur l'excitation de l'alternateur pour le compte du débit déwatté.

Messieurs, j'ai terminé.

Vous voudrez bien m'excuser si je suis entré quelquefois dans des détails trop spéciaux, qui ne vous intéressaient peut-être par tous.

LES PROGRÈS RÉCENTS DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE;

Par M. Pierre Weiss [1].

Une discussion serrée des conditions de production de la lumière n'étant possible que si elle est appuyée sur la connaissance des lois du rayonnement, nous commencerons par rappeler brièvement ces lois.

Nous devons distinguer deux cas qui diffèrent par l'origine de l'énergie rayonnée. Celle-ci peut être empruntée au réservoir thermique que constitue le corps rayonnant. Ou pour préciser : on peut supposer le corps rayonnant en relation avec une source de chaleur à température constante ou thermostat et envisager l'ensemble des cas où l'énergie rayonnée est empruntée à ce thermostat, sans qu'il y ait, à part cela, altération du corps rayonnant ou apport d'éner-

[1] Conférence faite le 6 juin 1905.

gie de l'extérieur sous une forme ou sous une autre ; tous ces phénomènes constituent le *rayonnement thermique proprement dit.*

Nous formerons un deuxième groupe des phénomènes dans lesquels le corps rayonnant passe d'un état initial déterminé à un état final différent, comme dans l'oxydation du phosphore ou dans le passage du sulfure de calcium de l'état insolé à l'état non insolé. Nous y joindrons ceux où le corps reçoit un apport d'énergie qui n'est pas de la chaleur provenant d'une source à la même température que lui, comme dans la fluorescence excitée par des radiations étrangères ou dans l'émission lumineuse du tube de Geissler provoquée par une dépense de travail électrique. Le terme collectif qui désigne tous ces phénomènes est celui de *luminescence*.

Si nous considérons une cavité fermée de toute part et dont les parois sont à une même température, conformément au principe de Carnot, il n'y a pas d'échange d'énergie entre les différents points des parois, mais on peut admettre avec Prévost que chaque élément de surface rayonne comme s'il était seul. Il convient alors d'imposer à ces divers rayonnements élémentaires la condition de se compenser mutuellement. C'est ce qu'a fait Kirchhoff. Il en résulte que le milieu, dans la cavité, est sillonné en tous points et dans tous les sens par des radiations de même intensité. Or un élément de paroi quelconque possède un certain pouvoir absorbant a pour toute direction de radiation incidente. Le nombre a indique la fraction de ces radiations qui est absorbée. Comparons cet élément de surface réel à un élément fictif qui absorberait toutes les radiations. Le milieu ne peut être dans le même état devant ces deux éléments de surface que si, pour toute direction, le premier élément de surface compense, par une émission plus faible que le dernier, les radiations qu'il renvoie déjà par diffusion ou réflexion. Il faut donc que, dans toute direction, la radiation absorbée et la radiation émise soient les mêmes et que, par suite, si l'on appelle pour un corps quelconque pouvoir émissif e la puissance qu'il émet dans une direction déterminée, et e_0 la même quantité pour le corps noir,

$$\frac{e}{a} = e_0.$$

Comme tous les corps absorbent très inégalement la lumière, il en résulte que les pouvoirs émissifs sont, eux aussi, inégaux et toujours inférieurs à celui du corps noir théorique auquel M. Guillaume a

donné pour cette raison le nom expressif de « radiateur intégral »

Ce corps noir n'est réalisé qu'approximativement au moyen du noir de fumée, mais puisqu'en pratiquant dans une cavité isothermique fermée une ouverture infiniment petite on trouble infiniment peu le régime de radiations de cette cavité, cette ouverture infiniment petite réalisera, avec l'approximation que l'on voudra, l'élément de surface du corps noir, tant au point de vue de son absorption que de son émission.

Kirchhoff a montré que la relation entre l'absorption et l'émission s'étendent à toutes les radiations simples et à toutes les directions de vibration qui composent la radiation complexe traversant en tous sens la cavité isotherme. Notons sans la démontrer cette extension de la loi de Kirchhoff aux éléments constitutifs de la radiation, dont la première partie seule est intéressante au point de vue où nous nous plaçons ici.

Remarquons ici que ces conséquences du principe de Carnot ne renseignent que sur la relation entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant pour les radiations qui circulent réellement dans une cavité isotherme à la température considérée, ou, en d'autres termes, qui sont émises par le corps noir à la même température. Pour toutes les autres radiations qui n'y figurent pas, l'existence d'un pouvoir absorbant ne permet en aucune façon de conclure à l'existence d'un pouvoir émissif et ne s'oppose pas à ce qu'il soit nul [1].

En résumé :

Le rayonnement qui sort d'une petite ouverture pratiquée dans une cavité isotherme ou qui émane d'un corps parfaitement absorbant contient chaque radiation simple avec une intensité indépendante de la nature des parois de la cavité et supérieure ou au moins égale à l'intensité de la même radiation simple émise par une surface égale d'un corps quelconque à la même température.

Si nous trouvons que dans certains cas l'émission d'une radiation particulière est plus forte que celle de cette radiation dans le radiateur intégral, nous devons en conclure que ces cas ne relèvent pas du rayonnement thermique, mais qu'ils font partie des phénomènes de luminescence auxquels ces lois ne s'appliquent pas.

Comparons maintenant le rayonnement émis par le radiateur intégral aux différentes températures. La loi de Stephan-Boltzmann,

---

[1] Cotton, *Revue générale des Sciences*, p. 102 ; 1899.

fondée sur la thermodynamique et sur l'existence d'une pression exercée par les radiations sur une paroi qu'elles frappent, nous apprend que l'énergie totale émise par le corps noir est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue θ. La constante de cette loi déterminée par Kurlbaum permet d'écrire la puissance rayonnée :

$P = 1{,}28 \times 10^{-12}\theta^4$ petites calories par centimètre carré et par seconde.

Il n'est pas possible de donner actuellement avec la même certitude la loi de la répartition de cette puissance entre les diverses longueurs d'onde. Mais supposons que cette loi soit établie pour une température particulière et représentée par une courbe dont les abscisses sont les longueurs d'onde λ et les ordonnées $\frac{\partial P}{\partial \lambda}$, de sorte que l'aire de la courbe représente P. M. Wien a montré, par un raisonnement reposant sur le principe de Doppler-Fizeau, que l'on passe de cette courbe à celle qui correspond à une autre température en réduisant les abscisses en raison inverse des températures absolues et en multipliant les ordonnées par la cinquième puissance de ce rapport des températures. Ainsi énoncée, cette loi contient la loi de Stephan-Boltzmann.

Il s'ensuit que, dans le passage à une température plus élevée, tout le spectre est déplacé du côté des petites longueurs d'onde.

La *fig.* 1 représente le résultat des expériences de MM. Lummer et Pringsheim sur l'énergie rayonnée par le corps noir en fonction de la longueur d'onde aux diverses températures. Les ordonnées des courbes sont les valeurs de $\frac{dP}{d\lambda}$ et les abscisses les longueurs d'onde. Cette famille de courbes peut être représentée d'une manière assez satisfaisante par la formule de M. Wien :

$$\frac{dP}{d\lambda} = C\lambda^5 e^{-\frac{c}{\lambda\theta}},$$

où C et c sont des constantes, et θ la température absolue. Les lignes pointillées sont celles que donne cette formule. Depuis lors, M. Planck a indiqué une formule :

$$\frac{dP}{d\lambda} = C\lambda^5 \frac{1}{e^{\frac{c}{\lambda\theta}} - 1},$$

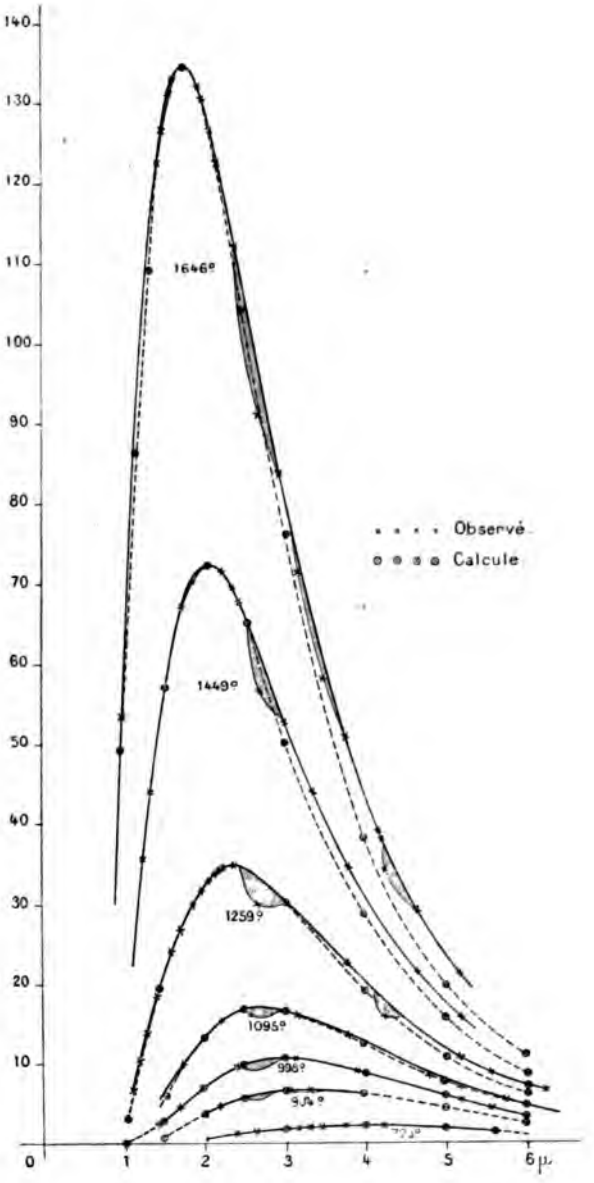

140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
3
4
5
6 μ
1646°
1449°
1259°
1095°
996°
934°
Observé
Calculé

FIG. 1.

qui est nettement préférable à la précédente dans la région des grandes longueurs d'onde. Ces formules sont l'une et l'autre conformes à la loi de Stephan-Boltzmann et à la loi de Wien.

On peut appeler *sources colorées* l'immense majorité des corps qui ont des propriétés nettement différentes de celles du corps noir. En général, le rapport dans lequel le pouvoir émissif d'un corps sera moindre que celui du corps noir à la même température ne sera pas le même pour les différentes régions du spectre. Certaines couleurs seront plus favorisées que les autres. Ce n'est que dans le cas extrêmement particulier où le rapport du pouvoir émissif à celui du corps noir serait le même dans toute l'étendue du spectre que cette dénomination serait impropre et devra être remplacée par celle de *corps gris*.

Puisque l'on dispose dans une certaine mesure, tant par le choix de la température du corps rayonnant que par celui des sources diversement colorées, de la composition spectrale de la lumière, il importe d'examiner, parmi toutes les radiations qui parviennent à notre œil, quelles sont celles qui jouent un rôle plus ou moins grand dans la vision.

L'œil perçoit les vibrations correspondant environ à une octave comprise entre les longueurs d'onde 0,4 μ et 0,8 μ. Les radiations qui sont au delà du spectre visible ne nous sont d'aucun secours dans la perception des formes et des couleurs ; elles sont dans la production de la lumière un phénomène parasite nuisible.

Mais, même dans le spectre visible, la sensibilité de l'œil varie énormément avec la longueur d'onde, et les diverses radiations simples sont, par suite, d'une utilité très différente. Les radiations qui sont sur les confins du spectre visible ne contribuent pour ainsi dire pas à la vision des objets qui les émettent.

Le procédé auquel se sont ralliés différents expérimentateurs [1], Macé de Lépinay, Langley, pour évaluer l'importance visuelle des radiations, consiste à déterminer la puissance minima qui est nécessaire dans les diverses couleurs pour permettre de lire les caractères d'une impression fine, par exemple d'une table de logarithmes. Le tableau suivant contient la valeur réciproque de ces puissances, que l'on peut appeler la sensibilité de l'œil pour les diverses radiations.

---

[1] Ch.-Ed. Guillaume, *Revue générale des Sciences*, p. 17 ; 1892.

Longueur d'onde	Sensibilité
0,34 μ	0,003
0,38	0,020
0,40 (violet)	0,128
0,45 (bleu)	2,70
0,50 (vert)	7,58
0,55 (jaune verdâtre)	5,38
0,60	0,95
0,65 (rouge)	0,07
0,70	0,012
0,75	0,00006
0,768 (rouge très sombre)	0,00001

Ces nombres ne doivent être considérés que comme grossièrement approchés, car ils diffèrent beaucoup d'un observateur à l'autre, comme le montrent les trois courbes de la *fig.* 2 qui ont été tracées par trois observateurs différents et se rapportent à la même quantité d'énergie. La différence d'aspect de ces courbes est l'expression du phénomène du daltonisme qui, étudié par ce procédé précis, semble devoir se révéler avec une généralité très grande.

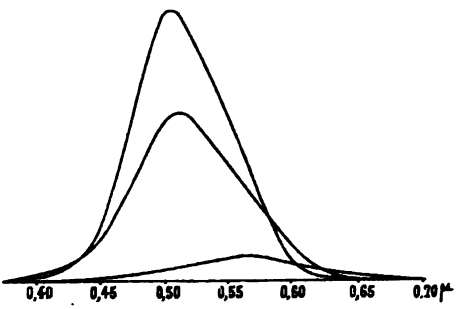


Fig. 2.

Nous sommes arrivés maintenant à un point qui nous permet de définir le rendement lumineux d'une source.

On aurait évidemment une première indication sur l'utilisation de l'énergie rayonnée en déterminant le rapport de l'énergie comprise dans les limites du spectre visible à l'énergie rayonnée totale.

Mais, outre que l'extrémité du spectre visible n'est pas bien déterminée et que la grande intensité qu'ont dans la plupart des sources les radiations situées sur les confins de l'infra-rouge introduirait dans cette évaluation un grand élément d'incertitude, il résulte du tableau ci-dessus que la répartition de l'énergie dans le spectre

visible proprement dit peut changer du tout au tout la valeur éclairante.

Le rendement photogénique, au sens indiqué ci-dessus, est, par exemple, pour :

Un bec Bengel.	0,012
La lampe à arc	0,025

On aura une meilleure image des phénomènes en faisant intervenir dans l'évaluation du rendement chaque radiation simple pour la part avec laquelle elle contribue à la vision, c'est-à-dire en lui attribuant un coefficient égal à la sensibilité relative que l'œil a pour elle, ce coefficient étant pris égal à 1 pour la région de sensibilité maxima et égal à zéro pour les radiations infra-rouges et ultra-violettes. Les sources ont alors, en général, des rendements encore beaucoup plus faibles que ceux que nous venons d'indiquer.

Seul le ver luisant (*Pyrophorus noctilocus*) qui répond merveilleusement aux conditions de bonne utilisation visuelle de la faible quantité de lumière qu'il émet, possède un rendement photogénique brut égal à l'unité, puisque tout son rayonnement est contenu dans le spectre visible, et ce rendement reste encore égal à l'unité quand on fait intervenir les coefficients de sensibilité de l'œil, puisque tout le rayonnement est concentré dans la région verte, où la sensibilité est maxima.

Quelque précieuses que soient les indications que donnent les nombres ci-dessus sur la sensibilité de l'œil aux différentes couleurs, on ne saurait se dissimuler leur valeur toute relative. Si des expériences du même genre faites par un très grand nombre d'observateurs permettaient de mettre en évidence une courbe de sensibilité moyenne, correspondant à une vue normale, on pourrait considérer cette courbe comme *définissant* la valeur éclairante relative de radiations de différentes couleurs. Dans le cas contraire, où il ne résulterait pas des observations une courbe normale, on ne voit pas comment on leur rattacherait légitimement une évaluation numérique du rendement, à moins d'admettre une valeur différente pour chaque observateur.

La complexité de la question résulte bien des recherches de MM. Broca et Sulzer [1], qui ont montré, entre autres, que l'influence

[1] *C. R.*, t. CXXXVII, p. 812, 944, 977, 1046; 1903.

de la durée de l'impression lumineuse est différente pour les différentes couleurs. Ces recherches mettent en évidence le rôle important de la fatigue, et l'on peut douter que les propriétés du pourpre rétinien soient telles que la vision, au moyen d'une couleur, soit indépendante de la fatigue causée simultanément par une autre couleur, ou, en d'autres termes, que l'on puisse calculer la sensibilité pour une lumière complexe à partir de la sensibilité pour chacun de ses éléments, comme nous l'avons supposé implicitement.

La question de la comparaison des lumières de différentes compositions spectrales a été résolue d'une manière toute différente, en ce qui concerne le corps noir aux différentes températures, par MM. Lummer et Kurlbaum [1].

Les deux côtés d'un photomètre Lummer et Brodhun étaient éclairés, l'un par la cavité incandescente réalisant le corps noir, portée à une température mesurée par le couple Le Chatelier, et l'autre par un étalon secondaire. L'égalité d'éclairement étant établie au photomètre, on élevait d'une petite quantité la température du corps noir dont l'intensité lumineuse augmentait, mais l'égalité photométrique pouvait être rétablie au moyen d'un secteur tournant d'ouverture variable placé sur le trajet des rayons provenant du corps noir. Cette expérience donne donc, pour la température à laquelle on opère, la valeur de l'accroissement relatif $\frac{\Delta E}{E}$ de l'éclat photométrique, comparé à l'accroissement relatif de la température absolue $\frac{\Delta\theta}{\theta}$.

On a donc en répétant cette mesure pour plusieurs températures :

$$\frac{\Delta E}{E} = f(\theta)\,\frac{\Delta\theta}{\theta}.$$

Le tableau suivant reproduit les résultats de ces mesures :

θ	900	1.000	1.100	1.200	1.400	1.600	1.900
$f(\theta)$	30	25	21	19	18	15	14

Il suffit d'intégrer cette équation pour obtenir une échelle des éclats photométriques du corps noir en fonction de sa température.

M. Guillaume a déduit de ces nombres, pour $f(\theta)$, une loi hyper-

---

[1] *Verhandl. d. deutsch. phys. Gesellsch.*, t. II, p. 89; 1900; — Ch.-Ed. Guillaume, *Rev. gén. des Sciences*, p. 364; 1901.

bolique qui conduit par intégration à l'équation

$$E = AT^3 (T - 650)^7,$$

et, comme la puissance émise obéit à la loi de Stephan, on a pour le rendement lumineux du corps noir l'expression :

$$R = BT^{-1} (T - 650)^7.$$

Cette formule extrêmement remarquable pourra rendre des services dans la discussion de l'influence de l'élévation de température sur le fonctionnement des sources de lumière. Pour ne citer qu'un cas, elle sera très appréciée de tous ceux qui, ayant à tenir compte de petites fluctuations du voltage pendant la mesure photométrique de lampes à incandescence, se sont proposé d'évaluer leur influence. Cette application reproduit si exactement les conditions des expériences de Lummer et Kurlbaum que sa légitimité ne saurait être mise en doute.

Par contre, si l'on envisage le résultat de leurs expériences après intégration, dans lequel l'éclat d'une source d'une certaine couleur est exprimé, semble-t-il, d'une manière rigoureuse par celui d'une source de couleur différente, on doit se demander où se dissimule la définition sans laquelle cette comparaison est impossible et l'on s'aperçoit que chaque opération de mesure à une température déterminée contient en réalité la définition de l'égalité d'éclat pour les radiations infiniment voisines. La définition est donc donnée de proche en proche grâce à la continuité du phénomène.

Mais cette remarque permet de poser la question de la légitimité de cette méthode. Si, partant du même point — corps noir à 900° — pour aboutir au corps noir à 1.900° absolus, on passait par une autre série continue d'intermédiaires, formée par exemple par des sources colorées convenables, arriverait-on à la même valeur pour le rapport des éclats extrêmes?

Ce rapport serait-il en outre le même que celui que l'on pourrait déduire par l'application des sensibilités de Langley ? Il est probable que non, et il n'y aurait plus de *loi;* mais on n'en conserverait pas moins le droit de donner sa préférence à l'échelle des éclats donnée par les expériences de Lummer et Kurlbaum au moyen du corps noir, puisqu'elle constitue une *définition* que l'on est libre de choisir arbitrairement.

Ces expériences suggèrent une autre application à la question qui nous occupe. On pourrait, semble-t-il, les calquer en décrivant l'échelle des éclats non pas en fonction de la température, mais en fonction de la longueur d'onde dans le spectre correspondant à une température déterminée, et refaire ainsi une échelle des sensibilités analogue à celle de Langley.

Enfin, une nouvelle méthode de photométrie hétérochrome, celle du photomètre à scintillement de Simmance-Abbady, nous fournit une solution générale du même problème, c'est-à-dire une nouvelle définition de la valeur éclairante relative des différentes couleurs. Ce sera la tâche des expérimentateurs d'établir si cette définition est vraiment univoque ou si le résultat dépend du mode opératoire, et ensuite jusqu'à quel point elle concorde avec la définition de Langley et celle de Lummer et Kurlbaum ([1]).

Ouverture de la pupille. — Il reste à mentionner un élément physiologique qui a été fréquemment signalé, mais auquel on n'accorde peut-être pas toujours dans l'estimation pratique de la valeur d'une source lumineuse l'importance qui lui revient. Je veux parler de la grandeur variable de l'ouverture de la pupille. Au grand jour, la pupille se contracte pour ne laisser passer qu'une minime quantité de lumière, tandis que, dans l'obscurité, elle se dilate, et il ne me semble pas impossible que la section du faisceau lumineux pénétrant dans l'œil varie dans le rapport de 1 à 20 ([2]). Cette protection automatique de la rétine contre les images trop vives semble déterminée moins par la quantité totale de la lumière qui tombe sur l'œil que par l'éclat spécifique des objets les plus lumineux, c'est-à-dire des sources de lumière elles-mêmes. On peut ainsi expliquer cette sensation que l'on éprouve souvent en comparant un arc nu et le même arc recouvert d'un globe dépoli. Le premier brille plus qu'il n'éclaire, et le second, bien que 30 à 40 0/0 de sa lumière soient absorbés par le diffuseur, fait pénétrer plus de lumière jusqu'à la rétine, grâce à une contraction moindre de la pupille. C'est à l'intervention de ce facteur physiologique que se rattache le grand intérêt de globes diffuseurs de verre cannelé, strié ou quadrillé qui, sans absorption notable,

([1]) Cette conférence était faite quand je me suis aperçu que ces expériences de Lummer et Kurlbaum se rapportent au platine incandescent, et non au corps noir comme M. Ch.-Ed. Guillaume et moi-même l'avions pensé. Les conclusions générales auxquelles nous arrivons ici n'en sont pas altérées. Voir aussi Eisler, *Electrot. Zeitschr.*, 10 mars 1904.

([2]) Lewis, *Ecl. électr.*; 1904.

donnent à la source lumineuse une surface apparente plus grande et qui ont été, à plusieurs reprises, présentés à la Société de Physique. Cet intérêt est indépendant du but que certains de ces diffuseurs poursuivent simultanément, en dirigeant le flux lumineux là où il est utile par une disposition qui rappelle les appareils projecteurs des phares.

Je ne sache pas que des mesures précises aient été faites de l'influence de la contraction de la pupille sur la valeur éclairante des sources. Ce facteur si important est inaccessible au photomètre. Peut-être pourrait-on faire des mesures directes du diamètre de la pupille dans diverses conditions d'éclairage.

Conséquences pratiques des principes. — 1° *Corps noirs.* — Beaucoup de sources lumineuses sont fondées sur l'émission du charbon incandescent, c'est-à-dire d'un corps approximativement noir. Pour celle des sources artificielles dont la température est la plus élevée, pour l'arc électrique, de beaucoup la plus grande partie de la puissance émise est infra-rouge; on voit donc que, pour toutes ces sources, on aura intérêt à *prendre une température aussi élevée que possible pour déplacer le rayonnement de l'infra-rouge dans le spectre visible.*

2° *Sources colorées.* — Restant dans le cas de la radiation thermique en passant aux sources colorées, on voit que celles-ci seront avantageuses ou non suivant que leur pouvoir émissif se rapprochera davantage du pouvoir émissif du radiateur intégral à la même température dans la partie visible ou obscure du spectre. Et comme, en général, la plus grande partie de l'énergie rayonnée se trouve encore dans l'infra-rouge, les corps colorés avantageux sont souvent ceux dont le pouvoir émissif augmente du côté des petites longueurs d'onde.

En général, le rendement lumineux des corps colorés croîtra avec l'élévation de température. Mais on ne peut affirmer pour les corps colorés que cette règle soit sans exception, tant qu'on ne connaîtra pas la variation des pouvoirs émissifs pour toutes les radiations en fonction de la température.

Les données physiques sur ces pouvoirs émissifs que nous possédons sont encore peu nombreuses; mais nous avons, du moins, deux déterminations complètes de puissance rayonnée aux diverses températures, pour le corps noir d'une part et pour le platine poli de l'autre, dues à MM. Lummer et Pringsheim. Nous avons déjà parlé de ces expériences sur les corps noirs.

A première vue, les courbes qui représentent l'émission du platine poli diffèrent peu de celles du corps noir; mais leur étude quantitative montre que l'énergie totale rayonnée n'obéit pas à la loi de Stephan. Elle est plus voisine de la proportionnalité à la cinquième puissance de la température absolue. Ceci peut s'interpréter en disant que le rapport du pouvoir émissif du platine poli à celui du corps noir croît avec la température. Il est, en effet, d'après les expériences de Lummer et Pringsheim :

T. abs.	0/0
372°,8	8,92
492	6,00
654	7,45
795	11,14
1.108	15,25
1.481	17,97

Lummer et Pringsheim ont montré que l'on pouvait représenter le rayonnement du platine poli par la formule du corps noir, de Wien, en remplaçant la température réelle par une température fictive plus élevée, dans le rapport de 1,12, et en réduisant la surface dans un rapport variable avec la température. Cette dernière circonstance n'intervient pas dans les questions de rendement, puisqu'elle affecte dans le même rapport les radiations visibles et invisibles.

M. Guillaume a utilisé cette manière d'exprimer le pouvoir émissif croissant du platine pour en déduire, au moyen de sa formule, le rapport du rendement lumineux du platine poli et celui du corps noir à la même température. Il suffit de le calculer pour θ et 1,129. A 1.850° abs. on trouve ainsi que le rendement lumineux du platine est 2,37 fois plus grand ; à 2.050 abs., c'est-à-dire au point de fusion du platine, il serait 2,89 fois plus grand que celui du corps noir.

Nous allons maintenant passer en revue les divers systèmes d'éclairage électrique actuellement en usage, en cherchant à établir, chemin faisant, comment leur mode de fonctionnement est en rapport avec les principes que nous venons de rappeler ; une étude technique complète dépasserait de beaucoup le cadre de cette conférence.

La lampe à incandescence(1) *à filament de carbone.* — Un filament

(1) Une grande partie des renseignements qui suivent est empruntée à M. Bainville (*Bull. Soc. int. d. Electr.*, t. V, 2e série, p. 363; 1905).

de carbone est porté à l'incandescence dans le vide. On évite ainsi les pertes d'énergie par convection, et le courant électrique fournit uniquement l'énergie émise sous forme de radiation. Pour une lampe du type courant, le rendement photogénique brut est de 2,6 0/0 environ, le rendement photogénique réduit est bien inférieur. Dans les premières lampes à incandescence, où le filament était formé de charbon noir mat provenant de la calcination d'un produit végétal, ses propriétés absorbantes étaient voisines de celles du corps noir théorique, et, par suite, ses propriétés émissives de celles du radiateur intégral. Le seul précepte à suivre pour obtenir un rendement photogénique élevé était donc de pousser la température aussi haut que possible, et il semble à première vue que rien ne s'oppose à ce que l'on aille très loin dans cette voie, puisque le point de fusion du carbone est très élevé. En réalité on est arrêté bientôt par un phénomène imprévu : la destruction du filament par évaporation électrique dans le vide. Cette évaporation est un phénomène de projection cathodique, elle a pour effet d'amincir et bientôt de couper le filament à la cathode. Simultanément elle recouvre l'ampoule d'une couche absorbante de charbon qui réduit considérablement le rendement lumineux, comme on font foi les nombres suivants obtenus par M. Bainville en nettoyant des lampes usagées à ampoules noircies et en les faisant fonctionner ensuite dans les mêmes conditions :

Avant nettoyage			Après nettoyage			Absorption pour 100
Volts	Ampères	Bougies	Volts	Ampères	Bougies	
250	0,24	7,7	250	0,24	10,77	20,6
120	1,33	13,1	120	1,33	44	70
125	0,78	22,7	125	0,78	47,86	54

Ces nombres montrent combien, même à défaut de la rupture, la vie utile des lampes est limitée par suite de cette absorption. On est donc conduit à faire un compromis entre l'amélioration du rendement et la prolongation de la durée des lampes, et le régime le plus avantageux dépendra évidemment du rapport entre le prix de la lampe et celui de sa consommation horaire. Une durée de six cents heures peut être considérée comme moyenne. Le tableau suivant montre l'accroissement rapide de l'intensité lumineuse avec le nombre de watts dépensés. Il se rapporte à une lampe de 16 bougies, 110 volts, qui consommerait, sous ce voltage normal, 57 watts. Il montre combien facilement la lampe à incandescence résoudrait le

problème d'un éclairage économique sans ce phénomène malencontreux de la pulvérisation cathodique.

Volts	Ampères	Watts	Bougies	Watts par bougie
53	0,227	12	0,09 ?	133 ?
66	0,287	19	0,5 ?	38 ?
79	0,352	27,8	1,7 ?	16,3 ?
91,6	0,415	38	4,8	7,9
98	0,447	43	7,4	5,92
104,2	0,479	50	11,1	4,5
107,5	0,495	53	13,2	4,03
113,7	0,527	60	18,7	3,2
120	0,561	67	25,5	2,65
132,7	0,63	83	45	1,85
144,7	0,702	101,5	72	1,41
156,8	0,78	122	108 ?	1,13 ?
169	0,80	135	145 ?	0,93 ?
190	0,896	170	215 ?	0,79 ?

Si la surface du filament était connue, la colonne des watts permettrait de calculer la température de la lampe par la loi de Stephan et de vérifier, au moyen des nombres de la dernière colonne, la loi du rendement lumineux de M. Guillaume, en supposant que le filament des lampes à incandescence puisse être assimilé à un corps noir.

Mais cette assimilation, qui aurait pu paraître assez légitime pour les premières lampes à filament de charbon, ne l'est plus pour les lampes actuelles, dont les filaments sont recouverts par incandescence dans une atmosphère d'hydrocarbures d'une couche de charbon graphitique très dur et élastique, d'aspect grisâtre, et possédant un éclat presque métallique. Ce dépôt de graphite a l'avantage de rendre, à température égale, la lampe plus résistante à la désagrégation et de permettre d'ajuster avec facilité la résistance électrique de la lampe toute construite à une valeur déterminée. Un hasard heureux a voulu que cette modification fût en même temps avantageuse au point de vue des qualités émissives de la lampe. Nous ne possédons pas les courbes donnant l'énergie rayonnée par le graphite en fonction de la température et de la longueur d'onde, mais on peut supposer que ses propriétés sont intermédiaires entre celles du radiateur intégral et celles du platine poli et sans doute plus voisines de ce dernier, de sorte que le rendement lumineux serait voisin de celui d'une lampe à filament noir possédant une température fictive plus élevée dans le rapport de 1 à 1,12, c'est-à-dire, d'après

e calcul de M. Guillaume, un rendement lumineux environ deux fois meilleur, un peu au-dessous de la température de fusion du platine. C'est là, sans doute, le facteur le plus important parmi ceux qui ont fait passer la consommation spécifique des premières lampes, qui était de 6 watts par bougie, à celle des lampes actuelles, qui est environ moitié moindre.

On n'est pas très bien fixé sur la température du filament des lampes à incandescence. D'après H.-F. Weber, elle est de 1.565° à 1.588° et atteint 40° de plus pour les lampes à gros filaments. M. Lechatelier, à l'aide de son pyromètre optique, a trouvé des chiffres bien plus élevés, voisins de 1.800°, et M. Janet, qui a fait des mesures au moyen d'une méthode très ingénieuse fondée sur l'étude du refroidissement d'un filament, a trouvé des chiffres de 1.610° à 1.720° pour des lampes de 16 bougies et 65 volts.

Parmi les nouveautés de ces dernières années on a vu apparaître les lampes à haut voltage, permettant de remplacer dans un réseau donné la tension de 110 volts par celle de 220 volts et de doubler ainsi sa puissance. L'avantage de cette transformation réside uniquement dans la meilleure utilisation du réseau. Les lampes de 220 volts ont, à intensité lumineuse égale, des filaments plus fins que celles de 110 volts et ne peuvent être poussées au même degré ; leur rendement est donc inférieur. M. A. Blondel indique que, tandis que la lampe de 16 bougies sous 110 volts consomme environ 50 à 55 watts, sous 220 volts sa consommation s'élève à 65 et 80 watts. Pour la même raison, à tension égale, les rendements des lampes de 5 à 10 bougies sont inférieurs à celui de la lampe de 16 bougies. A plus forte raison les lampes de 5 bougies et 220 volts par exemple sont-elles d'une réalisation difficile et peu économiques.

Inversement les lampes de grande puissance sont plus avantageuses. M. H.-F. Weber estime que leur température est de 40° plus élevée que celle des lampes courantes. M. Weissmann a cherché à donner à celles-ci les mêmes avantages, en subdivisant la tension de 110 volts, au moyen de petits transformateurs-réducteurs, en 5 fractions de 20 volts environ par lampe ; le diamètre du filament de la lampe de 16 bougies est alors le même que celui d'une lampe de 80 bougies et de 110 volts, et, d'après l'inventeur, le rendement est notablement augmenté. Les membres de la Société de Physique ont eu à plusieurs reprises l'occasion de voir ces lampes en service dans les locaux de la Société. Leur lumière plus blanche est agréable ; mais

la complication résultant de l'adjonction d'un transformateur par groupes de cinq lampes, ou moins, est de nature à opposer des difficultés sérieuses au développement de ce système.

Lampes à incandescence dans le vide à filaments autres que le carbone. — *a*) *Lampe Auer à filament d'osmium.* — Après de nombreux essais sur les métaux réfractaires, le Dr Auer von Welsbach, l'inventeur de l'incandescence par le gaz, fixa son choix, pour la construction d'une nouvelle lampe à incandescence électrique, sur l'osmium, l'un des métaux rares du groupe du platine. L'osmium fond vers 2.500°; il n'est pas très abondant, et, pour alimenter une fabrication régulière, l'inventeur est obligé de compter sur le retour à l'usine des lampes mises hors de service.

Le filament d'osmium est très délicat à fabriquer, le métal étant trop cassant pour se prêter au tréfilage. La première opération consiste à isoler l'osmium qui existe dans le résidu insoluble provenant du traitement de la mine de platine. Le métal, obtenu en poudre très fine par la réduction de l'acide osmique, est aggloméré, puis filé à la presse; les filaments séchés sont calcinés à haute température. On obtient ainsi des fils contenant un mélange d'osmium et de charbon; ces fils sont progressivement amenés au blanc éblouissant par un courant électrique dans une atmosphère contenant de la vapeur d'eau. On obtient, par cette opération, l'oxydation du carbone et celle de l'osmium; mais l'acide osmique, qui est facilement réductible, se détruit et redonne le métal. Après quelque temps de ce traitement, le filament est presque entièrement constitué par de l'osmium pur, mais il est poreux et a une surface rugueuse.

Le filament d'osmium est soudé, à l'arc électrique, sur des attaches en platine.

Comme le filament est mou à la température de l'incandescence, on est obligé de l'ancrer; cet ancrage se fait avec des crochets en oxyde de thorium qui sont fixés à l'extrémité de petites baguettes de verre, soudées elles-mêmes à l'ampoule. Malgré cet ancrage, les filaments, dans les lampes qui ne sont pas suspendues verticalement, s'incurvent; aussi leur donne-t-on généralement la position verticale.

Contrairement à ce qui a lieu pour le filament de charbon, la résistance du filament d'osmium a un coefficient de température positif qui est favorable à la résistance aux variations de tension des réseaux. Ainsi, d'après M. Fritz Blau, une augmentation de tension de 10 0/0 ne produit qu'une augmentation de courant de 6,5 0/0,

au lieu de 12 0/0 que l'on observe dans les lampes à filament de carbone. Il semble toutefois que toutes les lampes faites avec cette dernière matière n'aient pas des propriétés identiques. Des expériences faites récemment au Laboratoire central d'électricité n'ont donné, en effet, qu'un accroissement de l'intensité de 8,5 0/0. Pour la lampe au tantale, que nous décrirons plus loin, l'accroissement de courant est de 9 0/0 pour un accroissement de tension de 10 0/0.

L'augmentation de puissance lumineuse montre encore plus nettement le rôle autorégulateur du coefficient de température positif des fils métalliques; elle serait, pour un accroissement de 10 0/0 du voltage,

De 40 0/0 pour la lampe à l'osmium et pour celle au tantale ;
De 85 0/0 pour la lampe au carbone à 3,2 watts.

En régime normal, la consommation spécifique de la lampe à l'osmium est de 1,8 watt environ par bougie décimale.

Le modèle de 25 bougies Hefner à la tension de 40 volts possède un filament de 280 millimètres de longueur et de $0^{mm},087$ de diamètre. Pour réaliser cette lampe, on a été obligé de partager le filament en deux parties, montées en tension. Malgré cet artifice, les lampes doivent être montées par trois en tension sur les réseaux usuels de 100 à 120 volts, ce qui constitue une gêne appréciable. A d'autres points de vue, la lampe à l'osmium serait la lampe idéale: elle jouit d'une longévité remarquable, avec une constance très grande de rendement, comme cela résulte entre autres des données suivantes que j'emprunte à un certificat de la Reichsanstalt :

Des lampes à l'osmium de 38 volts ont été soumises à une étude qui a duré six cents heures. La consommation de courant de lampes de 30 à 35 bougies (Hefner) a été de 1,28 ampère, d'où l'on déduit une consommation spécifique de 1,58 watt par bougie Hefner (ou de 1,8 watt par bougie décimale) dans une direction perpendiculaire à l'axe de la lampe.

Pour la lampe suspendue on trouve, dans une direction horizontale, une consommation spécifique de 1,4 watt par bougie Hefner, au lieu des 2,5 à 3,5 watts qu'exigent les lampes à filament de charbon. La durée des lampes est supérieure à 1.000 heures. Si l'on excepte une lampe détruite accidentellement après 520 heures, la durée moyenne est de plus de 3.320 heures. Si l'on fixe comme limite de la vie utile le moment où l'intensité lumineuse initiale a baissé

de 20 0/0, aucune des lampes examinées n'a atteint cette limite, la destruction se produisant avant.

b) La lampe au tantale. — MM. Siemens et Halske, guidés probablement par les résultats obtenus avec la lampe Auer à l'osmium, chargèrent M. von Bolton de trouver un métal difficilement fusible et pouvant être étiré en fils très fins.

Après avoir étudié successivement le vanadium et le niobium, M. von Bolton arrêta définitivement son choix au tantale, qui est associé au niobium dans la plupart des minerais de ce métal. Les minerais de tantale et de niobium : les columbites, tantalites, niobites, se rencontrent généralement dans les roches granitiques ; ils sont disséminés à la surface du globe, mais sont tous très rares.

M. von Bolton a trouvé que le tantale est le plus infusible des trois métaux étudiés. C'est aussi celui qui se désagrège le moins facilement par le passage du courant. Le métal est obtenu par la méthode de Berzélius, en réduisant par le sodium ou le potassium le fluotantalate de potassium. La masse métallique obtenue, qui retient de l'hydrogène et de l'oxygène, est fondue dans le vide à plusieurs reprises.

La couleur de ce métal se rapproche de celle du fer. Il est ductile et malléable, peut être laminé en lames de $0^{mm},1$ et étiré en fils très fins. Le fil usité dans les lampes a $0^{mm},05$. Son poids spécifique est de 16,8 ; sa dureté est à peu près celle de l'acier doux et sa ténacité comparable à celle de l'acier ; sa résistance à la traction est de 93 kilogrammes par millimètre carré. Pour le fil très fin, la charge de rupture atteint la valeur de 190 kilogrammes par millimètre carré. Le nombre le plus élevé, à ma connaissance, qui ait été obtenu pour l'acier est de 250 kilogrammes par millimètre carré. La résistance spécifique à la température ordinaire est de 16,5 microhms : cm, c'est-à-dire dix fois celle du cuivre et deux fois celle du platine ; son coefficient de température est 0,003 entre 0° et 100°.

A la température de l'incandescence, la résistivité atteint 83 microhms : cm. Elle croît donc beaucoup plus rapidement que ne décroît celle du carbone. Enfin le tantale se ramollit à une température inférieure de plusieurs centaines de degrés à la température de fusion.

Au rouge sombre, le tantale se combine facilement à l'hydrogène et à l'azote en formant des combinaisons très cassantes.

Avec la première lampe, qui date du 28 janvier 1903, on reconnut que, lorsqu'on pousse la lampe de manière à faire tomber la consommation spécifique au-dessous de 1,5 watt par bougie, la lampe noircit rapidement. Le fil employé dans cette lampe avait $0^{mm},28$ de diamètre, était impur, ainsi qu'il résulte des expériences ultérieures, sa résistivité était à peu près double de celle du métal que l'on fabriqua plus tard.

Fig. 3.

Ce n'est qu'après six mois d'essais qu'on parvint à obtenir le tantale en fils du diamètre de $0^{mm},5$ qui avait été reconnu nécessaire. La *fig.* 3 représente le type adopté actuellement. Le fil, de $0^{mm},05$ et d'une longueur totale de 650 millimètres est supporté par deux séries de crochets de fils de nickel assez forts pour éviter l'échauffement. Chacune de ces séries est disposée en étoile, l'une de douze crochets à la partie supérieure, l'autre de onze crochets à la partie inférieure d'une colonne de verre. Le poids du fil de tantale est de 22 milligrammes, de sorte qu'avec 1 kilogramme on peut faire 45.000 lampes environ.

La fabrication d'une telle lampe, en partant du tantale étiré en

fils de diamètre convenable, est très simple. Si la confection du support à 23 branches est un peu compliquée, par contre il n'y a plus à renforcer le filament ni à le souder aux fils conducteurs : le fil de tantale est simplement pincé dans un petit tube de platine soudé à l'extrémité de chaque fil conducteur.

D'après les renseignements fournis par MM. Siemens et Halske, la lampe au tantale, au régime de 1,5 watt par bougie Hefner (soit 1,7 watt par bougie décimale), a une durée utile de 400 à 600 heures, c'est-à-dire qu'au bout de ce temps sa puissance lumineuse a baissé de 20 0/0. La consommation par bougie décimale est alors de 2,2 watts. Au régime de 1 watt par bougie Hefner (1,14 par bougie décimale), la lampe peut fonctionner plusieurs centaines d'heures ; mais elle noircit rapidement et est plus sensible aux variations de tension. Après cinq heures environ de fonctionnement, le fil de tantale a subi une transformation moléculaire qui a pour effet de réduire la consommation spécifique de 0,2 watt. En même temps il s'est contracté et s'est tordu sur les crochets qui lui servent de support. La résistance à la traction est alors devenue très faible, et cette modification s'accentue avec le temps à tel point qu'il n'est pas prudent de déplacer des lampes qui ont 200 ou 300 heures de service.

Nous reconnaissons dans la recherche de métaux réfractaires qui a guidé le Dr Auer von Welsbach et la maison Siemens et Halske l'influence de nos connaissances sur la composition spectrale de plus en plus favorable de la lumière émise par le corps noir aux températures croissantes. Mais, en outre, plus encore que le filament de charbon à éclat métallique des lampes actuelles, le filament d'osmium et celui de tantale doivent vraisemblablement bénéficier de l'émission sélective avantageuse des métaux polis, en se rapprochant des propriétés du platine, telles qu'elles résultent des expériences de MM. Lummer et Pringsheim. Ce sont donc des sources colorées; mais cette circonstance n'intervient en quelque sorte qu'accessoirement, à côté de la tendance vers une température élevée. Nous allons faire un pas de plus avec la dernière lampe à incandescence qu'il nous reste à décrire.

c) La *lampe Nernst* est fondée sur l'incandescence par le passage du courant électrique d'un bâtonnet composé de divers oxydes terreux. Ces oxydes ne conduisent pas le courant à la température ordinaire, tandis qu'à 600° ils acquièrent une conductibilité de nature électrolytique, qui permet le passage d'un courant suffisant pour entretenir et pousser davantage l'incandescence.

Je cède à la tentation de citer textuellement (¹) les termes avec lesquels M. W. Nernst, dans une conférence faite à Gœttingue le 9 mai 1899, donnait connaissance au public scientifique de sa remarquable invention. Cette conférence est intéressante non seulement par l'excellente description qu'elle donne de la lampe nouvelle, mais surtout parce qu'elle nous initie à la marche des idées de l'inventeur. Rendant justice à son précurseur Jablochkoff, M. Nernst nous montre comment il est arrivé indépendamment, par un ensemble de déductions s'appuyant sur une vue claire des conditions physiques de la production de la lumière et sur des connaissances approfondies de chimie physique, à imaginer un système d'éclairage aussi original que plein d'avenir.

« En 1877, Jablochkoff fit breveter une lampe électrique, dans laquelle de petites plaques de kaolin et de substances analogues étaient échauffées par les étincelles d'une bobine d'induction et ensuite portées à l'incandescence par le courant de la bobine.

« Par suite du mauvais rendement de cette lumière et surtout à cause des dangers et des inconvénients des tensions de plusieurs mille volts, cette lampe n'a jamais été en usage; elle est presque totalement oubliée. Aussi me suis-je fait un devoir de parler d'abord de l'essai de Jablochkoff.

« Par la théorie et d'ailleurs sans avoir connaissance du brevet en question, je déduisis qu'on ne pouvait construire des lampes à incandescence d'un bon rendement avec le charbon ou avec d'autres conducteurs métalliques; mais il était possible de les obtenir avec des conducteurs de 2e classe (électrolytes).

« On sait que toute source de lumière, outre les rayons lumineux, émet des rayons calorifiques qui n'ont aucune utilité pour l'éclairage, mais qui consomment inutilement de l'énergie (pour la lumière incandescente ordinaire, 97 0/0 de l'énergie employée; dans l'arc, 90 0/0). Plus on élève la température de la substance éclairante, plus on augmente le rapport de la lumière à la chaleur

« La supériorité du rendement lumineux d'une lampe à arc vient de ce que l'on porte le crayon de charbon à une bien plus haute température que ne le supporte à la longue le filament de la lampe à incandescence. Mais, comme pratiquement on ne pourra guère augmenter la température des lampes électriques, aujourd'hui il y a peu d'espoir d'accroître leur rendement lumineux.

(¹) Traduction A. E. G.

« On pourrait certainement faire un grand progrès s'il était possible d'employer comme corps incandescent des substances émettant peu de rayons calorifiques et avec lesquelles presque toute l'énergie électrique serait transformée en lumière.

« D'après moi, il est évident qu'il est possible de trouver maintenant de telles substances dans les conducteurs métalliques ou une combinaison de matières métalliques et minérales.

« Tous les corps opaques, d'après le principe absolu de Kirchhoff, émettent plus de rayons calorifiques que lumineux ; ils fournissent, en effet, ce qu'on appelle le spectre normal d'un corps noir. D'ailleurs, d'après la théorie électromagnétique de la lumière, bien établie, il faut que les conducteurs électromagnétiques soient opaques. On ne peut donc construire avec des conducteurs métalliques une lampe très économique (à moins d'opérer à la température de la lampe à arc ou à une température plus élevée encore).

« La production de lumière avec la flamme du gaz présente une certaine analogie avec notre problème. Tant que l'émission de la lumière se faisait uniquement par des molécules de charbon, on éprouvait toujours des pertes par les rayons calorifiques.

« Le remplacement de la flamme du gaz par des substances ne fournissant pas de spectre normal, comme le manchon Auer, fut donc un énorme progrès.

« Je profite de l'occasion qui m'est offerte pour m'élever contre une erreur très répandue ; il faut amener au manchon Auer moins d'énergie qu'aux molécules de charbon pour obtenir une certaine quantité de lumière. Mais, à une température donnée, les molécules de charbon émettent plus de lumière que le tissu Auer, parce que le maximum d'émission en chaleur comme en lumière est fourni par le corps noir de Kirchhoff.

« Le bec Auer supporte beaucoup plus facilement les hautes températures de la flamme que les molécules de charbon, car la proportion de la lumière à la chaleur y est plus favorable. Ainsi le bec Auer est de beaucoup supérieur à la flamme ordinaire du gaz. Je ne puis m'étendre maintenant sur les expériences probantes, à mon avis, que j'ai faites à ce sujet. Mais je puis dire que le problème Auer m'a suggéré des essais qui m'ont conduit à la solution de ma lampe électrique à incandescence.

« Il a donc suffi d'amener le tissu Auer dans la flamme du gaz pour lui donner une très haute température et par suite un très grand

pouvoir éclairant; mais, pour nous, il s'agit toujours d'échauffer par l'énergie électrique la magnésie ou d'autres oxydes analogues.

« Sans la formation d'étincelles et une très haute tension, l'électricité ne peut parcourir ou échauffer ces corps, en raison de leur grand pouvoir d'isolation.

« L'emploi des étincelles de haute tension pour chauffer à blanc des lamelles de corps réfractaires, comme le dit le brevet Jablochkoff, n'est pas utilisable pratiquement. Ceci, nous l'avions déjà constaté; mais on sait qu'à la fusion les oxydes et les électrolytes conduisent très bien l'électricité; mais il est impossible d'opérer avec des corps en fusion.

« La description des solutions solides, faite, il y a quelques années, par Van t'Hoff, fit supposer l'existence d'électrolytes solides ayant un pouvoir conducteur suffisant.

« Par des essais préliminaires, je pus constater que des mélanges d'oxydes, par exemple de magnésie et de kaolin, devenaient de très bons conducteurs à de très hautes températures (*Expérience*).

« Il fallait encore considérer que les électrolytes se décomposent chimiquement par le courant galvanique. Aussi pouvait-on craindre que le même courant qui chauffait à blanc l'électrolyte ne troublât bientôt sa composition chimique. En employant le courant alternatif, j'ai trouvé, comme c'était d'ailleurs à prévoir, l'électrolyse trop faible pour produire des troubles. Enfin, il fut aussi possible de rendre pratiquement nulle l'action électrolytique, bien plus forte, du courant continu.

« Nous ne pouvons pas encore construire une lampe avec des corps isolateurs à froid, car, même après la fermeture du courant, le corps incandescent reste froid, comme tout isolant.

« Mais, si l'on vient à l'échauffer, il devient légèrement conducteur; un faible courant le traverse, et, si l'on continue à élever sa température, le corps incandescent devient un conducteur parfait, et il restera tel pendant tout le temps de la fermeture du courant (*Expérience*).

« *Pour exciter* le corps incandescent, on le chauffera donc préalablement avec une source extérieure de chaleur. Nous construisons ainsi au moyen d'un corps incandescent électrolytique une lampe toujours prête à servir. Par suite de l'incombustibilité complète de l'oxyde, le vide de la lampe ordinaire devient inutile.

« L'échauffement du corps incandescent s'opère très facilement au

moyen d'une allumette (*Expérience*). On obtient ainsi une lampe peu coûteuse, mais pas très commode.

« Un second moyen est la combinaison du corps incandescent et d'un corps échauffeur électrique dont la chaleur est fournie, d'une façon convenable, par la même source que le courant qui traverse le corps incandescent. Nous obtenons ainsi une lampe automatique qui ne fournit la lumière que dix ou vingt secondes après la fermeture du courant. J'ai construit des lampes avec des appareils d'allumage fixes ou mobiles (*Expérience*).

« On pourrait peut-être penser, d'après ces explications et les expériences que j'ai montrées, que toute difficulté est aplanie et que l'on peut se mettre tranquillement à la construction des lampes.

« Je dois avouer qu'il y a un an j'étais aussi de cet avis; j'ignorais alors les obstacles que j'avais encore à vaincre avant de pouvoir livrer au public un appareil fonctionnant à peu près au laboratoire. Quand on a réussi à combler l'abîme profond qui sépare l'idée d'une invention de sa réalisation ou, en s'exprimant autrement, entre la théorie et la pratique, il faut encore parcourir le long et pénible chemin qui va de la pratique du laboratoire à celle de la vie courante. »

Comme le fait remarquer M. Nernst, les difficultés à surmonter étaient grandes dans les étapes successives de l'invention et l'on peut admirer sans réserve les trésors d'ingéniosité qui ont été dépensés pour mettre la lampe au point.

Malheureusement le public ne put s'habituer à l'idée d'allumer une lampe électrique avec une allumette ; il fallut donc adjoindre à chaque lampe l'appareil de chauffage électrique formé d'une petite spirale de platine noyée dans du kaolin. Un mécanisme électromagnétique coupe le circuit de l'appareil d'allumage lorsque le filament entre en fonction.

L'étude des propriétés du bâtonnet d'oxydes montra qu'une certaine tension minima est nécessaire pour conserver à l'état conducteur et incandescent le filament rendu conducteur par une source de chaleur extérieure. Au-dessous de cette tension le bâtonnet s'éteint. Au-dessus, le courant augmente d'intensité avec la tension, d'abord lentement, puis de plus en plus vite, et, pour une certaine valeur critique de la tension, le régime devient instable, le courant continuant à croître jusqu'à la destruction de la lampe sans nouvel accroissement de tension. Dans la figure ci-jointe (*fig.* 4), la courbe I représente la

caractéristique du filament, c'est-à-dire la relation entre l'intensité du courant et la tension correspondante. Le régime devient instable au point M, où la tension est maximum. Dans l'exemple choisi, ce maximum était de 200 volts. Comme dans les lampes à arc, on combat cette instabilité en ajoutant, en série avec la lampe, une résistance. Mais, pour réduire la consommation dans cette résistance tout en la rendant très efficace, il importe qu'elle ait un accroissement thermique

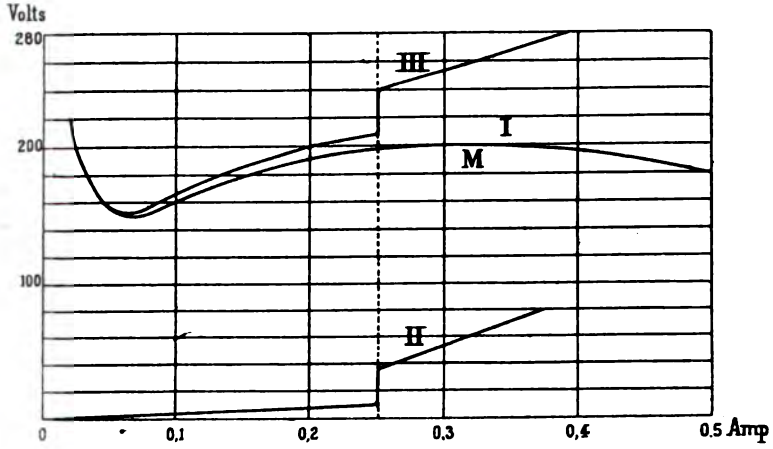


Fig. 4.

considérable. Le fer, indépendamment de son accroissement thermique en fonction de la température, possède la propriété de tripler brusquement de résistance à la température de son premier point de transformation au rouge naissant. La courbe II de la figure représente la caractéristique d'un fil de fer fin, que l'on enferme, pour le préserver de l'oxydation, dans une ampoule remplie d'hydrogène. Cette résistance absorbe, au-dessous du point de transformation, environ 15 volts pour un courant de 0,25 ampère, et 40 volts environ pour une intensité de courant extrêmement peu supérieure à celle-ci. La courbe III, la caractéristique résultante du système, obtenue par l'addition des ordonnées des courbes I et II, montre comment le résultat cherché a été obtenu par la suppression du maximum, cause de l'instabilité du régime.

Le schéma et la légende ci-dessous, empruntés au constructeur, montrent les principales dispositions d'un des modèles de cette lampe.

« Le filament *f* et la spirale de chauffage *c* sont adaptés sur une palette en porcelaine P pourvue de trois pièces de contact : les deux douilles *a* et *b* et la pièce plate en laiton *g* munie d'une vis de serrage. L'ensemble de ces pièces constitue le *brûleur*.

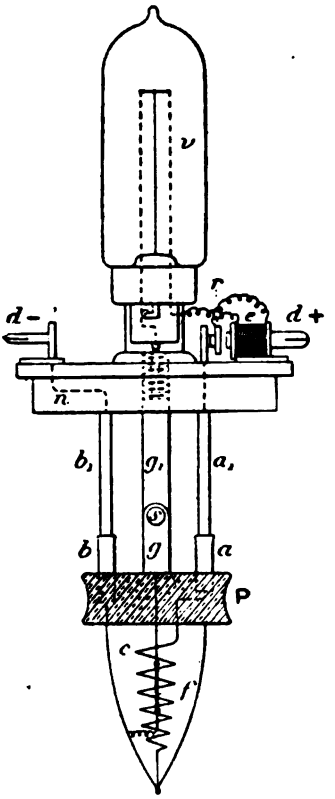


Fig. 5.

« Ces parties correspondent aux pièces a_1 b_1 g_1 de la lampe proprement dite. Le brûleur est adapté sur la lampe et immobilisé par le serrage de la vis *s*. L'appareil de chauffage se compose d'une spirale en porcelaine sur les spires de laquelle est enroulé un fil de platine très fin.

« L'interruption du courant de chauffage est obtenue par l'électro-aimant *e*.

« La résistance *v*, en fer, est adaptée sur la lampe par une petite

douille à baïonnette analogue à celle employée pour les lampes à incandescence ordinaires.

« Le courant est amené à la lampe par la broche *d* +. Ce courant passe dans la lame à ressort de l'électro-aimant, traverse par la broche *a* la spirale de chauffage *c* et passe par la canalisation *n* à la broche *d* —. Dès que le circuit est fermé, la spirale de chauffage devient rouge sombre.

« Dès que le filament a atteint la température à partir de laquelle il devient conducteur, le courant passe de la broche *d* + dans la bobine de l'électro-aimant *e*, dans la résistance *v*, le contact *g*, le filament *f*, et revient par la broche *d* — à la canalisation. »

Quand le courant qui traverse l'enroulement de l'électro-aimant a atteint l'intensité suffisante, le contact à ressort est attiré et le courant de chauffage est coupé en *r*.

Il n'a pas été possible de construire une lampe fondée sur l'emploi de conducteurs électrolytiques fonctionnant dans le vide, ce qui eût encore élevé le rendement lumineux déjà très bon de la lampe Nernst. Elle fonctionne donc à l'air atmosphérique, simplement protégée par un globe de verre, et l'énergie fournie par le courant est perdue par convection et par rayonnement. Et si, malgré cette infériorité, elle atteint les rendements des lampes au tantale et à l'osmium, cela ne peut être que grâce à une solution tout à fait remarquable du problème de l'émission lumineuse.

La durée moyenne de la lampe Nernst est de 400 à 700 heures; mais le brûleur, composé du filament et de la spirale de chauffage, est indépendant du reste de la lampe et doit seul être remplacé. La consommation spécifique augmente avec le temps. Je transcris ici le résultat d'un essai fait par la Reichsanstalt sur 6 lampes de 1 ampère et 220 volts.

	Intensité lumineuse en bougies Hefner	Watts par bougie Hefner
Au début.	153,2	1,54
Après 50 heures.	137,2	1,66
— 100 —	137,8	1,67
— 200 —	137,8	1,65
— 300 —	138,8	1,57
Moyenne	139,1	1,63

M. Nernst nous a dit le rôle important joué par le bec Auer dans

la marche de ses idées. Rappelons en quelques mots en quoi consiste ce que l'on pourrait appeler le problème du bec Auer [1].

Les nombreuses expériences qui ont été faites sur ce sujet en vue d'améliorer la qualité des manchons ont montré qu'il était avantageux d'avoir recours à un mélange de deux oxydes en proportion déterminée. A l'un des oxydes employés en grande quantité et qui joue le rôle de support, on ajoute un second oxyde en proportion minime (0,5 à 2 0/0).

Chose curieuse, chacun des deux corps ne semble présenter seul aucune aptitude à produire de la lumière. Dans le mélange le plus généralement employé, l'oxyde support est la thorine à la dose de 98,7 0/0, l'oxyde radiant est la cérite à la dose de 1,3 0/0. Les intensités lumineuses de trois manchons faits respectivement en thorine, cérite et mélange, et fonctionnant sur un même brûleur dépensant 100 litres à l'heure, sont :

Manchon de thorine	1	bougie
— cérite	7	—
— mélange	70	—

Des résultats analogues ont été obtenus par le mélange approprié d'alumine et d'oxyde de chrome, très employé en Angleterre (bec Sunlight).

M. Bunte suppose que chaque parcelle de cérite active la combustion de la flamme par un effet catalytique et est cause d'une élévation locale de température extrêmement considérable, la thorine jouant le rôle d'isolant thermique. Cette explication très ingénieuse est en contradiction avec une expérience de MM. Lechatelier et Boudouard, qui ont montré que l'éclat de la matière des manchons est le même dans la flamme et quand elle est portée à la même température en dehors de la flamme. Nous allons voir qu'elle n'est pas nécessaire. Les mêmes physiciens ont montré que le pouvoir émissif du mélange Auer à 1.300° environ croît plus vite du côté plus réfrangible du spectre que celui du platine poli à la même température. Ce mélange constitue donc une source colorée plus avantageuse que le

---

[1] Voir Ch. Féry, *Étude du rayonnement de quelques oxydes* (*Bull. Soc. franç. de Phys.*, 19 janvier 1903) ; — Ch.-Ed. Guillaume, *Rev. gén. d. Sciences*, p. 422 ; 1901. — Le travail de M. Rubens sur le même sujet, communiqué depuis à la *Versammlung deutscher Naturforscher und Aerzte*, Meran, 1905, n'était pas encore paru.

platine, qui a déjà, à la température des lampes à incandescence, un rendement de plus du double de celui du radiateur intégral. C'est là l'une des raisons du rendement lumineux élevé du bec Auer. Signalons une autre circonstance qui peut aussi avoir son importance et qui résulte nettement de l'étude de M. Féry. M. Guillaume (*loc. cit.*) avait déjà montré que la température d'un fil de platine, même très fin, n'est pas celle de la flamme dans laquelle il est plongé, mais inférieure et déterminée par l'équilibre entre la chaleur qui lui est amenée des gaz chauds par convection et celle qui en est enlevée par l'émission. La température d'un corps plongé dans une flamme sera donc d'autant plus élevée que son pouvoir émissif sera plus faible. Le pouvoir émissif du thorium est très faible, et sa température doit en conséquence être très élevée. Mais cela ne suffit pas, car l'effet de la température élevée peut être compensé par une coloration défavorable. L'addition d'une petite quantité de cérite change la coloration de la source et explique l'excellence des résultats obtenus. M. Féry montre en effet que le manchon est très absorbant pour les rayons lumineux quand il est porté à haute température et se rapproche ainsi par ses propriétés de celles du corps noir pour *les radiations auxquelles l'œil est sensible.* On me pardonnera cette digression qui, me semble-t-il, met bien en évidence l'intervention des lois de l'émission lumineuse dans la résolution des problèmes de l'éclairage.

Dans la lampe Nernst, le problème est différent en ce que la difficulté de l'apport d'énergie en quantité suffisante pour l'obtention de la température élevée n'existe pas. Par contre, elle exige une résistance plus grande à l'altération mécanique du corps incandescent, dont la moindre fêlure trouble le fonctionnement de la lampe. La solution pratique sera donc différente, mais la méthode mise en œuvre sera la même et consiste dans le choix et le dosage convenable des éléments constitutifs du corps incandescent. Aussi bien les descriptions récentes mentionnent-elles des bâtonnets composés de thorine, de cérite, de zircone et d'yttria à la place de la magnésie et du kaolin dont il était d'abord question.

Nous ne nous arrêterons pas à la *lampe à arc* ordinaire, on connaît ses avantages : sa belle lumière blanche et sa consommation spécifique faible, que l'on peut évaluer comme étant industriellement égale à 0,6 à 0,7 watt par bougie décimale pour les arcs à courant continu de 300 à 1.500 watts. Ce bon rendement tient à la température élevée des charbons, que des déterminations concordantes de

diverses origines nous enseignent être voisine de 3.500°. La loi du déplacement de Wien nous apprend en effet que le produit

$$\lambda_m \theta = C^{te},$$

où λ_m est la longueur d'onde du maximum de $\frac{\partial P}{\partial \lambda}$ (Voir p. 270) et θ la température absolue.

λ_m étant exprimé en microns et θ en degrés centigrades, la valeur de cette constante est 2.900, et par suite :

$$\lambda_m = \frac{2900}{3773} = 0,77.$$

Le maximum de puissance du radiateur intégral ayant la température de l'arc se trouve donc dans le spectre visible, tandis que, pour toutes les autres sources artificielles, il se trouve dans l'infra-rouge.

Dans l'arc, les charbons s'oxydent librement à l'air. Il est résulté de la tentative d'éviter cette usure en empêchant le libre accès de l'air atmosphérique une lampe nouvelle, « l'*arc en globe clos* ou arc enfermé », qui a des propriétés nettement différentes de celles de l'arc ordinaire [1].

L'insuccès des premières tentatives faites dans cette voie provenait de ce que les inventeurs cherchaient simplement à mettre à l'abri de l'air un arc ordinaire. Dans ces conditions, le récipient se couvrait rapidement d'une couche opaque de poussière de charbon. C'est en 1894 seulement qu'a paru l'arc enfermé moderne, qui est caractérisé par l'emploi d'un arc très allongé fonctionnant sous une tension de 75 à 80 volts, double de la tension ordinaire, dans une enceinte imparfaitement close.

La lampe de M. Marks, ou celle de M. Jandus, consiste en principe en un arc voltaïque enfermé dans un double globe, dont le second, fermé par un obturateur de forme spéciale, permet la dilatation de l'air sous l'action de la chaleur développée par l'arc et ne permet qu'un échange très faible entre les atmosphères intérieure et extérieure. Le grand globe extérieur, fermé par une soupape, constitue lui-même une seconde enceinte préservatrice qui se remplit de gaz brûlés dans le petit globe. La combustion des charbons

---

[1] Voir A. Blondel, *Rapp. Congr. d'Électr.*, p. 224 (1900), que je cite presque textuellement.

placés dans ces conditions est extrêmement retardée et leur renouvellement ne se fait que toutes les 150 ou 200 heures.

L'arc obtenu dans le mélange de gaz peu favorables à la combustion présente un aspect tout spécial : le charbon positif supérieur est à peine creusé ; parce que l'arc tourne constamment autour de son extrémité, le charbon négatif inférieur est presque plan; leur distance normale est d'environ 8 millimètres pour un arc de 80 volts.

Les avantages des arcs enfermés sont : l'indépendance des foyers, leur montage sur 110 volts, ou par paire en série sur 220 volts, l'extrême simplicité du mécanisme, la consommation très réduite de charbon, la réduction de la main-d'œuvre. Leurs inconvénients sont la teinte bleue de la lumière, les variations d'éclat et le rendement médiocre.

En effet, d'après MM.. A. Blondel et Jigouzo, le rendement de l'arc enfermé n'est que les 2/3 environ de celui de l'arc ordinaire de même puissance.

Par le voltage élevé sous lequel elle fonctionne, 80 volts aux bornes, 108 à 120 volts en y comprenant la chute de tension dans la résistance de réglage, la lampe Liliput, mise récemment dans le commerce par la maison Siemens et Halske, se rapproche des arcs enfermés. Elle semble être une solution heureuse du problème souvent abordé de l'arc de faible puissance. Ses propriétés sont résumées dans le tableau suivant :

Intensité	Voltage aux bornes	Durée des charbons	Intensité hémisphérique avec un globe albâtre	Puissance par bougie aux bornes de la lampe
2 ampères	80 volts	16 à 20 heures	130 b. Hefner	1,2 watt
3 —	80 —	12 à 14 —	350 —	0,7 —

Cette lampe est donc destinée à entrer en concurrence moins avec les arcs ordinaires qu'avec la lampe Nernst, dont elle possède à peu près la puissance et le rendement.

Arcs-flammes. — L'arc électrique a bénéficié ces dernières années du courant d'idées conduisant à la substitution des sources colorées aux sources noires. Reprenant une idée déjà ancienne, mise en valeur par Jablochkoff en 1876, et consistant à volatiliser dans l'arc des oxydes alcalino-terreux, *Bremer* incorpora dans les charbons de lampes à arc, qui ont figuré à l'Exposition de 1900, de la chaux, de la strontiane et de la magnésie dans des proportions de 20 à 50 0/0. Le fluorure de calcium paraît particulièrement avantageux. En va-

riant la composition des charbons, on obtient à volonté des lumières rougeâtre, orangée, jaune d'or ou blanche, et il semble que ce soit la lumière jaune, dans laquelle prédomine le spectre du calcium, qui soit la plus économique. Des additions convenables de fondants ont pour effet de débarrasser les charbons de scories gênantes. La physionomie caractéristique de cet arc consiste en ce que, tandis que dans l'arc ordinaire les charbons fournissent la presque totalité de la lumière, l'arc proprement dit n'en fournissant souvent que 5 0/0, ici l'arc contribue pour une part importante à l'intensité totale. Il en résulte que l'on peut allonger l'arc sans craindre de diminuer trop son rendement et le faire fonctionner sous les voltages les plus divers. En présence des nombres très différents donnés par les différents auteurs, il est difficile d'indiquer une consommation spécifique. On rencontre des nombres descendant jusque dans le voisinage de 0,1 à 0,2 watt par bougie Hefner *hémisphérique* moyenne. Mais il semble bien qu'on n'exagérera pas la portée économique de ce nouveau système en évaluant qu'il donne la même quantité de lumière pour moitié moins d'énergie que l'arc ordinaire, soit environ 0,3 watt par bougie. L'arc à flamme bat donc actuellement le record de la consommation spécifique. Autre chose est d'apprécier l'agrément et la valeur artistique de ces lumières fortement colorées encore peu répandues chez nous.

Nous avons vu qu'il n'était nécessaire, ni pour la lampe Nernst, ni pour le bec Auer, d'invoquer les phénomènes de luminescence, comme on a cherché à le faire quelquefois pour expliquer leur rendement élevé. Les propriétés du rayonnement thermique et celles des sources colorées y suffisent. Il est plus malaisé de distinguer dans les arcs-flammes quelle est la part du phénomène purement thermique et dans quelle mesure, par le passage du courant à travers les gaz incandescents, il y a production de lumière aux dépens du travail électrique, sans mettre à contribution le réservoir calorifique formé par le corps rayonnant.

Avec l'*arc au mercure* de Cooper Hewitt, nous quittons le domaine de l'émission thermique, intégrale ou colorée, pour entrer dans celui de la luminescence. Cette source, employée par Arons d'abord, puis par plusieurs autres physiciens, dans des recherches scientifiques. a été étudiée en Amérique, dès 1898, par Cooper Hewitt en vue des applications à l'éclairage. L'arc jaillit entre une électrode négative de mercure et une électrode positive de fer dans un tube parfaitement

vide d'air. La colonne lumineuse remplit tout le tube et n'émet guère que trois radiations dans le spectre visible, une radiation jaune orangé, une radiation verte et une radiation violette. La lampe à arc au mercure a donc un grave inconvénient, elle supprime complètement la vision des objets rouges, qui paraissent noirs. Il y a bien des cas où il importe de voir les objets sans qu'il y ait nécessité à reconnaître les couleurs qu'ils auraient à la lumière du jour. La lumière de l'arc au mercure, qui ne fatigue pas la vue, est d'un usage excellent dans les chantiers, dans certains ateliers. Mais, quand il est nécessaire de voir même approximativement les couleurs, il faut ajouter, par exemple au moyen de lampes à incandescence ordinaires, les radiations rouges qui font défaut. Une gaze colorée avec de la rhodamine, substance fluorescente rouge, qui recouvre la lampe, permet d'obtenir un résultat analogue en transformant en radiations rouges une partie des radiations visibles et ultra-violettes. La perte de lumière que l'emploi de ce palliatif entraîne est de 25 0/0.

Les arcs du modèle actuel, de plus de 1 mètre de longueur, fonctionnent avec 3,5 ampères sous 110 volts. Cooper Hewitt a trouvé que l'on obtenait le rendement optimum quand la température était dans le voisinage de 140°. A cette température, la pression maxima de la vapeur de mercure est de 3 millimètres environ.

M. Maurice Leblanc, dans une conférence faite devant la Société française de Physique, le 29 avril 1905, a donné une description très complète des propriétés physiques de l'arc au mercure et de ses applications; cette circonstance me dispensera d'entrer ici dans plus de détails; je rappellerai seulement que la consommation spécifique est faible, environ 0,45 watt par bougie, chiffre qu'il convient d'accueillir plus que tout autre avec les réserves que commandent les difficultés de la photométrie hétérochrome.

A la température de l'arc au mercure, l'émission thermique du corps noir et de tous les corps colorés est entièrement infra-rouge et bien loin du spectre visible. Le rayonnement ne peut donc se faire que directement aux dépens de l'énergie électrique. Ce fait a son importance : avant l'application de l'arc au mercure, on avait cherché à plusieurs reprises à utiliser les phénomènes de luminescence dans les tubes à gaz raréfié en vue de l'éclairage. On se souvient des tentatives de Tesla et tous les laboratoires possèdent les appareils pour la lumière froide de Moore; mais aucun commencement de

succès n'avait autorisé jusqu'à présent à attribuer à ces tentatives un caractère pratique.

Avec l'arc au mercure, les phénomènes de luminescence entrent dans le domaine industriel et y prennent une place importante. Et en même temps tombent les barrières théoriques que les lois physiques du rayonnement opposaient à la production économique de la lumière.

Pour l'emploi de phénomènes analogues à celui de l'arc au mercure, l'apport de l'énergie sous forme de travail écarte les restrictions que la thermodynamique pourrait apporter à sa transformation en énergie de radiation d'une longueur d'onde déterminée : car le travail est équivalent à de la chaleur provenant d'une source de température aussi élevée qu'on pourra l'imaginer. Quand les lois des phénomènes de luminescence seront mieux connues, il est probable qu'elles traceront à leur tour des limites aux applications possibles ; mais ces limites seront autres que celles du rayonnement thermique, et l'exemple de l'arc au mercure est là pour dire qu'elles ne seront pas étroites.

C'est donc du côté de la luminescence que les chercheurs doivent diriger leurs efforts.

ÉTAT ACTUEL DE LA TÉLÉPHONIE [1];

Par M. G. de la Touanne.

L'extraordinaire développement de la téléphonie et la multiplicité des problèmes pratiques déjà résolus soit pour les petits, soit pour les grands réseaux, dans l'agencement des postes privés, l'installation des bureaux centraux, la construction des lignes et l'exploitation rendent impossible l'exposé complet, en une heure et demie ou deux heures, de l'état actuel de cette industrie. Grâce à la grande obligeance de hauts fonctionnaires étrangers et au très amical concours de M. l'ingénieur H.-L. Webb, qui ont bien voulu me prêter pour cette conférence de fort intéressants clichés, j'essaierai néanmoins de vous en donner une idée juste et de vous en mettre sous les yeux les caractéristiques principales, recueillies un peu partout : sauf peut-être en un ou deux cas, aucune entreprise privée ni publique ne s'est trouvée, jusqu'à une date récente, assez riche pour doter une région importante d'un système homogène en accord avec tous les progrès acquis ; tel détail a donc été enregistré à un endroit et tel autre l'a été ailleurs : ce qui va suivre vous fera percevoir, je l'espère, l'importance de l'outillage et la somme d'efforts mis en jeu.

Poste d'abonné. — Microphone. — L'idée généralement assez rudimentaire qu'on se forme de la téléphonie est basée la plupart du temps sur la simple connaissance du poste d'abonné : or, au fur et à mesure que les procédés se perfectionnent, le poste d'abonné et la manœuvre de ce poste se simplifient, tandis que se complique le bureau central où sont transférés tous les organes délicats ou soumis à une usure appréciable. En fait, la notion prise du service par la vue d'un poste apparemment de plus en plus simple tend à devenir de plus en plus fausse.

Au début de la téléphonie, bon nombre d'entre vous se le rappellent, — et nous avons du reste encore dans les réseaux secondaires de nombreux exemples de cette disposition, — microphone transmetteur et téléphones récepteurs étaient, au poste d'abonné, accompagnés d'une pile pour l'appel, d'une pile pour la conversation et d'une son-

---

[1] Conférence faite le 16 juin 1905.

nerie indépendante, le tout relié par pas mal de fils, assez encombrant et, semblait-t-il, peu facile à simplifier. Il faut en effet pouvoir appeler son correspondant (pile d'appel), être appelé par lui (sonnerie), lui parler (microphone) et l'entendre (téléphone). Rapidement néanmoins l'usage se répandit de grouper sur un même socle la sonnerie et le microphone ; puis la pile d'appel fut remplacée par une petite machine magnéto-électrique genre Siemens, et des arrangements spéciaux permirent (*fig.* 1) de fixer sur le socle le poste entier, microphone M muni naturellement de son crochet commutateur ordinaire et du téléphone T, sonnerie S et machine magnéto-électrique *m* dans la même boîte, et pile de microphone P. C'est, avec des variantes inévitables dans le détail, le groupement généralement adopté aujourd'hui dans le monde pour les postes appartenant à de petits réseaux ou à des réseaux secondaires. Dans les grands réseaux, la simplification est poussée plus loin encore : machine magnéto et pile de microphone ont disparu ; tout ce qu'on voit (*fig.* 2), c'est un microphone d'aspect réduit, un ou deux téléphones et le ou les timbres d'une sonnerie.

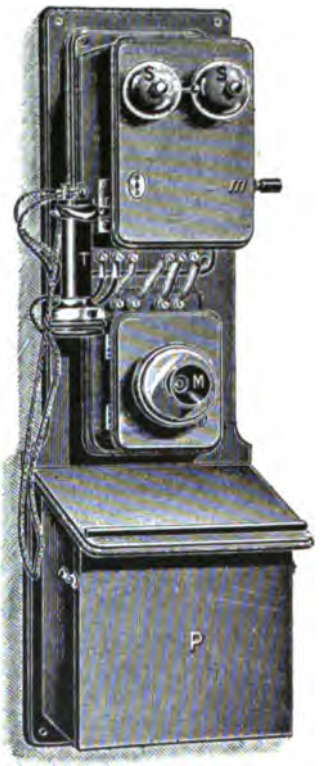


Fig. 1.

Le microphone, du reste, a changé de nature. Les meilleurs transmetteurs de jadis, tels que le microphone Crossley, le microphone Ader, le microphone d'Arsonval, étaient dérivés du microphone de Hughes à crayons de charbon (*fig.* 3). Les microphones modernes, ceux qui permettent de communiquer à 1.500 et 2.000 kilomètres, sont dérivés du microphone à grains de charbon breveté en Angleterre en 1878 (1) par le pasteur irlandais Henry Hunnings et consistant

(1) Provisional specification *Transmitters for telephones* sealed the 24th december 1878, and listed the 16th september 1878, n° 3647.

essentiellement en deux plaques conductrices parallèles, l'une rigide, l'autre flexible, électriquement reliées par du charbon de cornue en menus morceaux ; si l'on parle devant la plaque flexible, celle-ci, par les mouvements vibratoires qu'elle prend, détermine dans la masse

Fig. 2.

granulaire placée derrière elle des variations de compression qui font nécessairement varier les surfaces de contact entre les grains et se traduisent par des variations de résistance de l'ensemble : un courant passant à travers cette masse subit des variations d'intensité, et si ces variations sont suffisamment rapides, comme c'est le cas

lorsqu'elles sont déterminées par les ondes sonores, devient capable d'actionner un téléphone soit directement, soit à travers une bobine d'induction ; le principe est fort simple. Étudié, perfectionné, mis au point, le microphone à grains sous diverses formes se substitue partout graduellement au microphone à crayons. Mais j'ai le devoir de rappeler ici que, si la demande de brevet anglais de Hunnings a été déposée le 16 septembre 1878, M. Charles Bourseul, alors fonctionnaire de l'Administration française des Télégraphes, qui déjà, en 1854, avait eu la prescience du téléphone magnétique et avait affirmé sa croyance dans la possibilité de transmettre électriquement la parole[1], présentait à notre Société, dans la séance du 20 décembre 1878[2], un microphone à « poudre de coke compris entre deux feuilles de placage de frêne munies au centre d'un contact de charbon de cornue à 2 ou 3 millimètres l'un de l'autre », et dont le principe était par conséquent tout à fait semblable à celui du microphone de Hunnings qu'il ne pouvait connaître à ce moment.

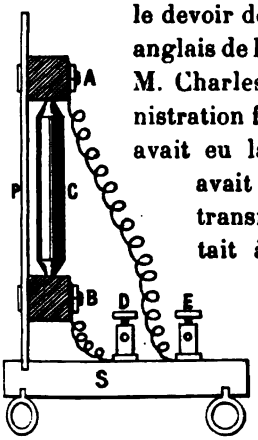


Fig. 3.

Revenons au poste d'abonné : comment va-t-on s'en servir ? Pour obtenir une communication et mener à bien une conversation, nous devions autrefois, et nous devons encore dans nombre de réseaux dont l'importance ne justifie pas et, toute difficulté financière mise de côté, ne justifiera peut-être jamais l'équipement avec du matériel comportant les derniers perfectionnements, sonner en poussant un bouton d'appel ou en tournant la manivelle d'une machine magnéto, décrocher ensuite le téléphone pour le porter à l'oreille et demander le correspondant, puis, la conversation terminée et le téléphone raccroché, sonner à nouveau pour faire rompre la connexion entre notre ligne et celle du demandé. Dans le poste d'abonné des grands réseaux modernes, nous avons vu tout à l'heure qu'il n'existait plus ni pile, ni bouton d'appel, ni machine magnéto ; les appels vers le poste central paraissent donc supprimés. En réalité ils ne le sont pas ; mais l'émission des signaux, demande ou fin de conversation, est devenue

---

(1) *Illustration*, 26 août 1854, p. 139 ; — *Annales télégraphiques*, 1877, p. 167.
(2) *Séances de la Société française de Physique*, 1878, p. 200 et p. 201.

automatique, et l'abonné désirant une communication n'a plus, enlevant le téléphone du crochet, qu'à le porter à l'oreille, demander la communication et, une fois la conversation terminée, raccrocher le téléphone. Telle est l'ingéniosité des dispositifs adoptés que, pendant ce temps et sans autre intervention de l'abonné, le poste central a successivement reçu un signal d'appel, constaté la correspondance des deux intéressés et saisi l'achèvement de la conversation. C'est ce qu'on appelle les systèmes à batterie centrale, parce que, entre autres particularités, on y trouve tout ce qui est pile ou accumulateur rassemblé au poste central, sans qu'il en reste rien dans les postes d'abonnés.

Soit pour les réseaux petits ou moyens, soit pour les grands réseaux bien équipés, nous voici donc conduits à examiner le poste central.

Poste central. — Pour établir l'intercommunication entre les lignes aboutissant au poste central, les commutateurs suisses usités en télégraphie furent naturellement employés les premiers, toutes les lignes d'abonnés, alors unifilaires, aboutissant à des barres verticales disposées dans un même plan et des barres horizontales dans un plan parallèle, à petite distance des premières, servant avec l'aide de fiches à relier entre elles deux lignes d'abonnés quelconques : des dispositions supplémentaires étaient prises pour le signalement des appels et des fins de conversation. Mais, destiné à relier un abonné appelant quelconque avec un quelconque de ses coabonnés, le poste central doit assurer entre les divers circuits y aboutissant toutes les combinaisons deux à deux ou plutôt tous les arrangements deux à deux de ces circuits, et le nombre en croît vite; de 2 pour 2 postes et de 12 pour 4, il est déjà de 9.900 pour 100 abonnés ; quand on arrive à 10.000, il atteint 100 millions ou peut s'en faut. Or le plus grand commutateur suisse qui ait été construit à ma connaissance l'a été pour les besoins télégraphiques de l'Administration belge et ne dépassait pas une capacité de 200 lignes. Vous sentez qu'au fur et à mesure du développement de la téléphonie il a fallu combiner d'autres commutateurs que les commutateurs suisses du début, bien loin du reste de cette capacité de 200.

Successivement on vit apparaître les systèmes du genre de celui, très remarquable pour l'époque, que présentait la Société générale des Téléphones à l'Exposition d'Électricité qui eut lieu à Paris en 1881, les commutateurs « Standard », dont le premier mis en service en Europe fut acheté par l'Administration suisse des Télé-

graphes à cette même exposition du Palais de l'Industrie de 1881, et plus tard les commutateurs multiples dans leurs diverses transformations. A propos des tableaux commutateurs de la Société générale des Téléphones, je vous rappellerai que pendant longtemps la caractéristique principale du réseau de Paris, ce qui le différencia de tous les réseaux du monde, fut l'emploi des lignes bifilaires (1) ; les circuits entièrement métalliques y furent en effet adoptés dès l'origine à la suite des travaux d'une commission mixte comprenant les représentants de la Société et les ingénieurs de l'Administration des Télégraphes : ce sont les tableaux commutateurs bifilaires de ce réseau qui étaient au Palais de l'Industrie ; aujourd'hui la nécessité des lignes bifilaires pour assurer une conversation correcte et aisée n'est plus contestée nulle part. Nous reviendrons sans doute sur ce point.

Les commutateurs genre « standard » forment actuellement l'outillage partout adopté en principe pour les petits réseaux ou les réseaux secondaires; d'autre part, les multiples qui forment celui des grands bureaux centraux constituent le développement logique de ce même appareil; à ce double point de vue, il y a lieu de noter les dispositions essentielles et la manœuvre du « standard ». Sur un panneau vertical (*fig.* 4) sont disposés : 1° à la partie inférieure CDEF, l'ensemble des *jacks*, c'est-à-dire des parties terminales des lignes (dans les standards, les jacks apparaissent simplement sur le panneau sous forme de petits anneaux, de petites bagues en laiton); 2° à la partie supérieure ABCD, une rangée d'annonciateurs de fin de conversation et au-dessus les annonciateurs d'appel (2). Jacks et annonciateurs d'appel sont numérotés, le jack et l'annonciateur de même numéro correspondant à la même ligne d'abonné. Une tablette horizontale IKL supporte des fiches *f*, *f'* disposées deux par deux l'une devant l'autre et prolongées par des cordons; ceux-ci, composés de fils conducteurs enveloppés de coton ou de soie, pendent sous la tablette et le panneau ; en avant de chaque paire de fiches et relié à elles à travers les cordons est disposé un jeu

(1) La seconde caractéristique fut la disposition des électro-aimants d'annonciateurs *en dérivation* entre les deux fils du circuit et non pas en embrochage, selon le terme usité, sur les fils eux-mêmes.

(2) Dans la figure, les annonciateurs de fin de conversation sont disposés suivant la bande EFGH, au-dessous de la région des jacks ; mais ce n'est pas là l'agencement généralement adopté.

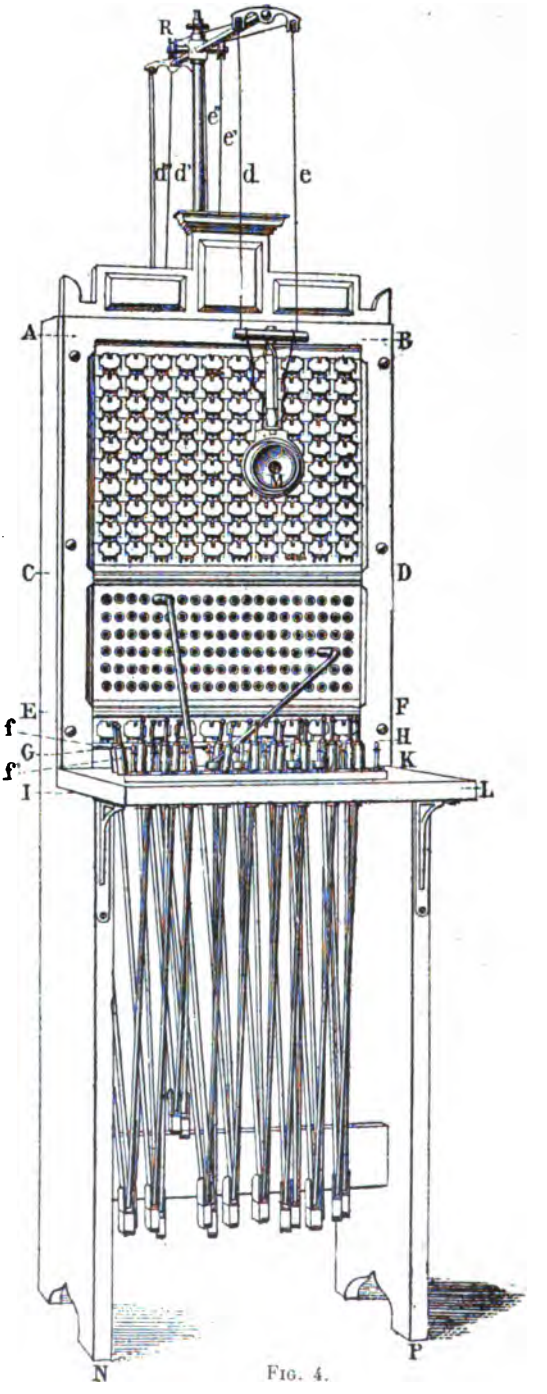


Fig. 4.

de clefs de contact dont nous allons voir à l'instant l'usage ; il est éga-

Fig. 5.

lement relié à un annonciateur de fin de conversation déterminé, celui qui se trouve dans le plan vertical comprenant déjà le jeu de clefs lui-même et la paire de fiches. Un microphone M, destiné à la téléphoniste, est suspendu en avant du panneau vertical à un support qui permet d'en régler la position en hauteur et en profondeur selon la taille et les habitudes de l'employée ; celle-ci n'a point à le tenir : un dispositif plus récent indiqué par la *fig.* 5 est encore plus commode en ce que la téléphoniste, sans gêne, emporte le microphone avec

Fig. 6.

elle dans tous ses mouvements et le retrouve toujours dans la même position par rapport à elle. D'une façon analogue, le téléphone est monté à l'extrémité d'un ressort plat assez léger (*fig.* 6 et 5) que la téléphoniste passe sur sa tête et qui maintient le téléphone à son oreille : c'est l'ensemble auquel on a donné parfois le nom assez imprévu de casque ; le poids (téléphone, ressort et cordons de jonction avec le meuble compris) est d'environ 300 grammes.

Un abonné voulant communiquer et poussant à son poste le bouton d'appel ou tournant la machine magnéto, fait fonctionner au poste central l'annonciateur d'appel relié à sa ligne, c'est-à-dire qu'un petit volet tombe, indiquant que l'abonné appelle, comme tombent les volets d'annonciateurs dans certains tableaux de sonnerie employés chez les particuliers.

L'opérateur assis devant le commutateur saisit une fiche, la fiche arrière par exemple, d'une paire disponible et l'enfonce dans le jack numéroté comme l'annonciateur qui a fonctionné. En même temps, il manœuvre l'une des clefs du groupe, dite clef d'écoute, et par là met en communication avec ces cordons, c'est-à-dire en ce moment avec la fiche utilisée et avec la ligne d'abonné, son poste de service, microphone et téléphone, qui lui permet de poser à l'abonné demandeur la question réglementaire : « Quel numéro ? » L'opérateur, par suite des dispositions que nous avons vues tout à l'heure, ayant les deux mains libres, manœuvre du reste à la fois la fiche de réponse et la clef d'écoute ; en d'autres termes, cette double manœuvre ne prend qu'un temps : de même, pendant que l'employé interroge l'abonné, il relève le volet de son annonciateur. Ayant donc demandé « quel numéro ? » et reçu la réponse, la téléphoniste, qui, tout en posant la question, a saisi la seconde fiche de la paire de cordes (la fiche antérieure), la porte dans le jack dont l'appelant a indiqué le numéro et sonne le demandé en appuyant un instant sur la clef d'appel : l'établissement de la communication est terminé, la ligne composite demandeur-demandé est constituée ; les abonnés n'ont qu'à parler. Bien entendu la clef d'écoute est ramenée au repos. Par l'enfoncement des fiches établissant la communication, l'opérateur a du reste mis automatiquement hors circuit les annonciateurs d'appel du demandeur et du demandé ; en revanche, il a établi sur la ligne composite l'annonciateur de fin de conversation affecté à la paire de cordes. Dès lors, quand les abonnés, ayant terminé leur conversation, sonneront pour faire remettre leurs lignes au

repos et les rendre ainsi libres pour toute communication ultérieure en provenance ou à destination de leur propre poste, ils actionneront l'annonciateur de fin, sans que puisse fonctionner aucun de leurs annonciateurs individuels; la téléphoniste n'aura point à se tromper sur la signification du signal.

Au reçu de ce signal de fin, la téléphoniste retire les deux fiches et, sans avoir presque à les guider, les laisse revenir dans leurs alvéoles de repos, sous l'influence du poids tenseur dont est muni chaque cordon; en même temps elle relève le volet de l'annonciateur de fin. Par l'aisance des manœuvres, par la compacité et la judicieuse disposition du matériel, le « standard » réalisa un énorme progrès dans l'outillage des postes centraux. Aujourd'hui encore, on peut le considérer comme le tableau commutateur normal des petits postes et des postes secondaires. Dans les postes de quelques unités seulement, on emploie des commutateurs analogues, bien que plus réduits.

A l'époque où le « standard » représentait le tableau commutateur le plus perfectionné, des raisons de construction le firent établir pour 50, puis pour 100 numéros, et, comme on prit l'habitude d'attribuer à chaque téléphoniste deux standards à 50 ou un standard à 100, on arriva le plus souvent à la proportion de 1 opérateur par 100 lignes. On a pu, avec les standards, parer au développement du service dans des bureaux desservant un nombre d'abonnés déjà considérable; il y eut tel bureau qui, équipé avec de simples standards de type peu perfectionné, fonctionna, et fonctionna bien, jusqu'à 1.500 abonnés. Ce fut là, il faut le dire, à peu près un tour de force, dont le secret résidait tout entier dans l'esprit de méthode et la discipline excellente du personnel.

Multiples. — Présentement, les exigences croissantes de la téléphonie et aussi les nouvelles ressources créées par l'invention et les perfectionnements successifs des *multiples* font considérer 600 abonnés comme la limite au delà de laquelle il est préférable de renoncer aux standards et de recourir aux multiples. Parmi les raisons diverses que je ne puis ici passer en revue, j'en mentionnerai une qui ne demande pas de longs développements. Supposons un bureau équipé avec des standards de 100, une téléphoniste par standard : chacune peut atteindre les jacks, les lignes d'abonnés *demandés*, placés devant sa ou ses voisines immédiates; mais, si la ligne du demandé aboutit plus loin, la téléphoniste qui a reçu la

demande doit, par un procédé quelconque, faire intervenir une de ses collègues, celle devant qui se trouve le jack du demandé. De là des répétitions d'indications et de manœuvres, des retards ; de là aussi, comme on ne peut admettre que ces indications soient données à haute voix à travers le bureau, la nécessité d'établir, d'un tableau commutateur à l'autre et sur ces tableaux, des organes accessoires affectés au renvoi des communications entre les postes d'opérateurs ; de là, en résumé, incertitude, perte de temps et perte de place.

Supposons au contraire que, par un procédé quelconque, chaque téléphoniste, après réception d'un appel, puisse atteindre directement le jack de tout abonné demandé, elle complétera par elle-même, sans dépendance vis-à-vis de quiconque, sans délai et sans travail supplémentaire, la communication désirée. Là est l'idée mère des multiples. Comme *appelants*, les abonnés avec leurs jacks et signaux d'appel spéciaux, personnels, restent distribués par groupes de 100, 150 ou davantage, chaque groupe surveillé par une même téléphoniste. Mais, *comme appelés éventuels*, ils sont, à portée de chaque téléphoniste, représentés par un jack d'usage banal pour toute communication à destination de leur ligne, et pour ce motif dénommé *jack général*, tandis que le jack spécial à l'abonné, celui du groupe de 100 à 150 ou plus, ci-dessus visé, jack sur lequel on se porte pour recevoir la demande consécutive à son appel, est dénommé *jack individuel*. L'existence des jacks généraux n'implique pas que la

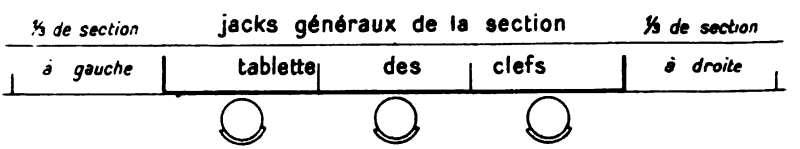


Fig. 7.

ligne d'abonné se subdivise au bureau entre autant de jacks généraux qu'il y a de téléphonistes, car, de même que pour les standards, une téléphoniste peut atteindre les jacks placés devant ses voisines. Le groupe de jacks généraux représentant une fois, et une seule, à portée de la téléphoniste, toutes les lignes d'abonnés, porte le nom de *section :* la section se répète identique à elle-même de proche en proche tout le long du meuble, chaque section nouvelle étant exactement juxtaposée à la voisine ; chaque section comporte trois places d'opérateurs, en sorte que la téléphoniste du centre atteint la section

entière, celle de droite les deux tiers droits de la section plus le tiers gauche de la section contiguë de droite, la téléphoniste de gauche les deux tiers gauches de la section plus le tiers droit de la section contiguë de gauche : à chaque place d'opérateur, comme je l'ai dit, est affecté un groupe de 100, 150, etc., jacks individuels et signaux individuels d'appel à surveiller. La répétition des lignes d'abonnés sous forme de jacks généraux, cette faculté de les atteindre en des points multiples d'un grand bureau, ont fait désigner les commutateurs dérivés du principe que je viens d'exposer sous le nom de commutateurs *multiples*, et les lignes y sont dites *multiplées*. Grâce à un artifice spécial, l'opérateur, avant de relier à la ligne appelante une ligne demandée, peut s'assurer que celle-ci n'est pas déjà occupée et se garder ainsi d'introduire un tiers, l'appelant actuel, dans une conversation déjà engagée : on dit alors que l'opérateur fait l'*essai* de la ligne.

Mais la capacité des multiples n'est pas indéfinie, c'est-à-dire que le nombre de jacks généraux massés sur la surface d'une section est forcément limité : au delà, il faut de nouveau recourir aux renvois de communication d'un meuble à l'autre, comme précédemment avec les standards, et subir l'intervention de deux téléphonistes. Ce sont là de graves inconvénients auxquels il importe de se soustraire le plus longtemps possible. On a donc tout naturellement cherché à conserver les avantages des multiples par un accroissement de la capacité de ces meubles : aussi, de perfectionnement en perfectionnement, la capacité des multiples a-t-elle été en augmentant constamment. Il y a quinze ans, la capacité maxima pratique était par beaucoup estimée à 6.000; on arrive aujourd'hui à 9.600 (bureau de la rue Desrenaudes à Paris), 14.400 (Bruxelles), 18.000 (Londres, nouveau central) et 20.000 (Budapest). Il va de soi que toujours les jacks généraux sont distribués systématiquement, de manière que l'opérateur, au simple énoncé du numéro d'un demandé, sache où trouver le jack correspondant. A cet effet, les jacks, analogues à ceux des standards, mais plus petits, sont montés dans de l'ébonite par réglettes de 20 (*fig.* 8), semblables à celle que je tiens, et les réglettes empilées par 5 ; on obtient ainsi des centaines distinctes, séparées des centaines de droite ou de gauche par les montants du meuble et des centaines supérieures ou inférieures par de minces réglettes en bois blanc : le meuble se présente ainsi (*fig.* 9) sous l'aspect de panneaux verticaux encadrés latéralement par les montants et laissant

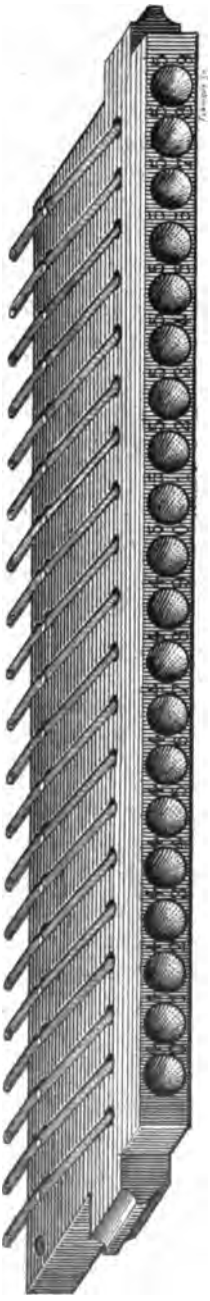


Fig. 8.

sur le fond sombre, coupé de centaine en centaine par des lignes blanches horizontales, apparaître nettement les petits cercles métalliques, les petites bagues en laiton, qui représentent les jacks : ceux-ci sont numérotés uniformément dans chaque centaine et le numéro de la centaine apparaît à côté d'elle sur une étiquette d'ivoire fixée au montant gauche du panneau, la première centaine, celle d'indicatif 0, en bas du premier panneau de gauche de la section, la seconde centaine, celle d'indicatif 1, dans le second panneau, au même niveau, et ainsi de suite jusqu'au dernier panneau de la section ; puis on recommence dans le même ordre une nouvelle couche de centaines par-dessus la première, et ainsi de suite. Selon les dimensions des jacks et les besoins de l'entreprise exploitante, la section comprend un nombre de panneaux différent : c'est ainsi qu'on trouve 7 panneaux dans le multiple de la rue Gutenberg, troisième étage, à Paris, et 10 dans le récent multiple de Budapest, auquel nous avons fait allusion.

Multiple à batterie centrale. — En même temps qu'augmentait le nombre des abonnés augmentait aussi le nombre de leurs conversations respectives et, il faut bien l'avouer, leurs exigences : on demande toujours plus qu'on a, c'est une imperfection à laquelle les abonnés n'échappent pas. Sous l'influence de cette tendance et aussi pour des raisons beaucoup plus sérieuses, les multiples ont subi des transformations qui, dans les réseaux comme Bruxelles, Budapest, Londres par exemple, où l'on a pu différer la réorganisation jusqu'à une époque récente, et dans celui de New-York qui, pour des raisons diverses, s'est trouvé à la tête du

Fig. 9.

mouvement, ont fini par doter les abonnés d'un service quasi automatique. C'est le service, c'est le genre de manœuvres auxquels je faisais allusion en débutant. C'est le système dit de la « batterie centrale ».

Sans détail de montage ni de communication, en voici, dans les grandes lignes, le fonctionnement. Au moment où l'abonné enlève le téléphone du crochet commutateur de son poste, le crochet, obéissant à un ressort de rappel, ferme le circuit de la ligne d'abonné; comme celle-ci, au poste central, se complète à travers le jack individuel sur une batterie d'accumulateurs et un relais commandant une petite lampe à incandescence telle que celle-ci (*fig.* 10), la lampe s'allume et illumine la lentille opaline dont elle est coiffée : l'illumination très nette, bien que très douce, de cette lentille, du reste en saillie, attire instantanément l'attention de la téléphoniste. Compact et dénué de tout mécanisme comme il est, ce signal peut être disposé en réglettes où il est immédiatement superposé au jack individuel (*fig.* 11), et par là diriger instantanément, au moment où elle saisit la fiche de réponse, le mouvement de la téléphoniste vers le jack individuel même où elle doit enfoncer cette fiche ; le mouvement est rendu presque instinctif, l'action est franche et brève. En même temps, de la main ne manœuvrant pas la fiche, la téléphoniste, comme avec le standard, met sur position d'audition la clef d'écoute correspondant à la paire de cordons attaquée ; elle pose aussitôt à l'appelant la question « quel numéro ? » L'appelant donne le numéro de l'abonné qu'il désire, ce numéro est collationné, c'est-à-dire répété pour contrôle, par la téléphoniste, et celle-ci, qui a déjà saisi la seconde fiche, dite fiche d'appel, de la paire de cordes, n'a plus qu'à l'enfoncer, si la ligne demandée est libre, dans le jack général correspondant placé à sa portée, puis à sonner le demandé. La communication est complète et la téléphoniste se retire. Toute lampe individuelle est séparée du circuit demandeur-demandé ; en revanche, deux autres petites lampes, grâce à des relais, sont reliées respectivement au cordon de chacune des fiches ; quand les abonnés ont terminé et remettent leurs téléphones au crochet, les deux lampes en question s'éclairent, et voilà tout le signal de fin de conversation.

Fig. 10.

Dans la parfaite simplicité de manœuvres qu'il comporte, le système ci-dessus de jonction et de disjonction de deux lignes constitue le point capital de l'ensemble; tout y converge, et nous devons nous y arrêter.

J'ai dit tout à l'heure : « si la ligne demandée est libre, la téléphoniste n'a plus qu'à enfoncer la fiche d'appel dans le jack général correspondant ». Mais la ligne peut n'être pas libre, et voici deux hypothèses entre lesquelles il faut avoir le moyen de décider : 1° la ligne est libre; 2° la ligne est occupée. De plus, pour que la conversation puisse s'engager, même la ligne étant libre, il faut que le demandé vienne au téléphone, d'où, s'il n'y vient pas, une troisième hypothèse : ligne libre, l'abonné ne répond pas. Enfin, dans les trois cas, le demandeur doit être mis au courant de la situation. Comment, sans perte de temps et avec sûreté, satisfaire à ces exigences?

A. Ligne libre ou ligne occupée. La téléphoniste (nous savons qu'elle a le téléphone constamment à l'oreille), se préparant à enfoncer la fiche d'appel dans le jack général, touche du bout de cette fiche la bague formant l'entrée du jack: 1° si elle n'entend aucun bruit au téléphone, elle sait que la ligne est libre, achève l'enfoncement de la fiche, sonne le demandé et se retire du circuit en ramenant au repos la clef d'écoute. Si l'appelé répond, la conversation s'engage entre lui et le demandeur resté à l'appareil (nous verrons plus tard à quoi se réduit en ce cas, dans un réseau bien mené, l'attente du demandeur); 2° au

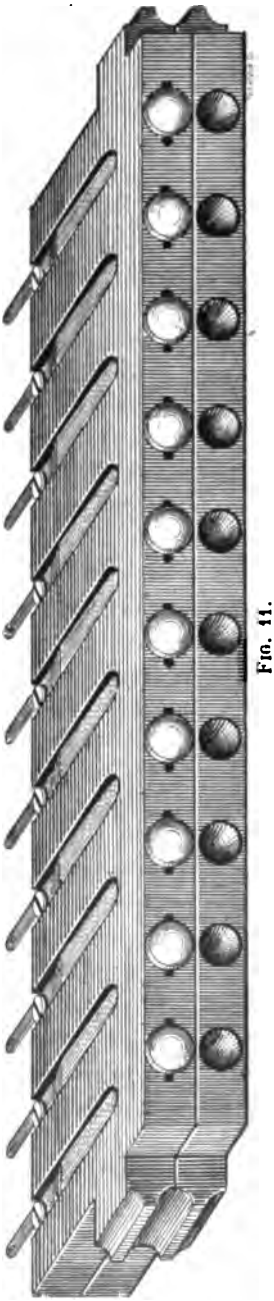


Fig. 11.

contraire, si le contact entre la pointe de la fiche et le jack général détermine dans le téléphone d'opérateur un petit claquement, un *tac*, la téléphoniste apprend par là que la ligne demandée est occupée et ramène la fiche ; avant toutefois de l'abandonner dans son alvéole de repos, elle l'enfonce dans un certain jack dit de « ligne occupée », auquel aboutit un circuit de trembleur. Le demandeur, son téléphone à l'oreille, perçoit le bruit rythmé du trembleur, connaît, sans autre manœuvre ni conversation, que la ligne est occupée, remet son téléphone au crochet et retourne à ses affaires.

B. Ligne libre, l'appelé ne répond pas. Avant tout, notons que les deux lampes de cordons permettent de suivre d'une façon absolument continue, sans y intervenir et simplement à la vue, les phases de la communication sur la ligne composite demandeur-demandé, ce qui les fait du reste désigner sous le nom de *lampes de surveillance* ou *de supervision*. Les relais qui les commandent sont en effet disposés de telle sorte que, les abonnés étant en conversation, les deux lampes restent éteintes ; par contre, l'un des abonnés, pour une raison quelconque (absence, recherche d'un renseignement, etc.), laisse-t-il ou met-il son téléphone au crochet, la lampe du cordon correspondant à cet abonné s'allume, la lentille opaline s'éclaire. Dès lors, avant qu'un abonné appelé ne soit à l'appareil, la lampe appartenant au cordon de la fiche d'appel est lumineuse, tandis que celle du côté du demandeur, qui a son téléphone à l'oreille, reste obscure. Quand, au bout de quelques secondes, le demandé décroche son téléphone, il provoque l'extinction de sa lampe, les lentilles opalines deviennent toutes deux obscures, la téléphoniste sait que les abonnés correspondent. Si l'appelé ne répond pas, sa lampe de surveillance va rester lumineuse, et la téléphoniste, tout en vaquant à d'autres communications, ne pourra s'empêcher d'apercevoir, sur la tablette horizontale des clefs et des fiches, en avant d'une paire de cordons en service, cette paire de lampes placées l'une devant l'autre et dont l'une est allumée, l'autre sombre : au bout d'un instant, si la situation reste la même et sauf à sonner de nouveau préalablement le demandé, elle retirera du jack général la fiche d'appel et, l'enfonçant dans un second jack spécial, à trembleur d'un rythme nettement distinct du précédent, donnera ainsi au demandeur, sans perdre en conversation son temps ni le sien, sans se détourner par exemple de l'établissement d'une autre communication, le signal « abonné ne répond pas ». Enfin si, dans le cours ou à la fin

d'une conversation, un abonné veut rappeler le poste central, il lui suffit de faire osciller le crochet de son poste et de déterminer ainsi une série d'éclats dans la lampe de supervision correspondante; l'illumination intermittente de la lentille qui la coiffe provoque l'attention de la téléphoniste, et celle-ci rentre sur la ligne en manœuvrant la clef d'écoute.

En somme il y a là un système de signalement remarquablement simple et remarquablement complet, et la portée en dépasse de beaucoup l'agrément procuré à l'abonné en le dispensant d'appuyer sur un bouton de sonnerie ou de tourner une manivelle de magnéto ; la proximité du jack et de la lampe individuels, la surveillance des phases de la communication et le signal automatique de fin de conversation ont un tout autre intérêt. Sur ce dernier point j'ajouterai un mot : il y a nécessité majeure pour la régularité et la promptitude du service à ce que toute ligne cessant d'être utilisée soit remise à la position d'attente, sinon les communiquants antérieurs subiront un délai quand ils voudront une autre communication ou bien, s'ils sont demandés par un autre abonné, on refusera leur ligne parce qu'elle sera trouvée occupée ; de plus, toute communication restant sans besoin établie entre deux lignes implique l'immobilisation inutile d'une paire de cordons, qui parfois pourrait être employée ailleurs et qui, si elle n'a pas d'emploi immédiat, encombre indûment le tableau commutateur. A tous égards, l'indication précise de la fin de la conversation par la correction de fonctionnement du matériel et la fidélité des abonnés à émettre le signal présente une grosse importance.

Or il arrive souvent, là où le signal de fin n'est pas automatique, que des abonnés négligent de le donner ; le personnel, faute de le recevoir régulièrement et trop fréquemment obligé d'intervenir de lui-même pour s'assurer si une conversation est encore en cours ou se trouve terminée, prend l'habitude de se porter à chaque instant sur les communications établies pour poser l'agaçante question « Terminé ? » Sur ce point l'amélioration du service dans les réseaux non dotés de matériel moderne est, question de bonne marche des appareils réservée bien entendu, entre les mains des abonnés ; devant l'indifférence d'un trop grand nombre parmi eux, il n'est pas douteux que l'automaticité du signal de fin ne constitue un énorme progrès.

Diverses questions pourraient être abordées au sujet du système de signaux dont il s'agit ; mais l'heure avance et je passe.

Postes centraux automatiques. — Là où la liberté d'action des entreprises publiques ou privées n'a pas été entravée, vous voyez que le service est devenu pour les abonnés d'une simplicité, d'une facilité et (nous le verrons tout à l'heure) d'une efficacité remarquables. Mais si, dans les systèmes dont je viens de vous donner une idée, une large part est déjà faite à l'automatisme, ne peut-on aller plus loin ? En d'autres termes, ne peut-on supprimer les employés? C'est une question que les abonnés posent en tous pays, et il leur semble parfois que, si les téléphonistes étaient supprimées et remplacées par quelque engin mécanique, on serait bien près de la perfection. Il convient à ce sujet de ne pas entretenir de trop vastes espoirs. Le mécanisme en question, l'ensemble d'appareils destinés, sur l'appel d'un poste, à en aller chercher un quelconque parmi plusieurs centaines ou plusieurs milliers d'autres, présente nécessairement un certain degré de complication ; comme tout appareil ou ensemble d'appareils, il sera sujet à des dérangements. D'autre part, on ne supprimera jamais complètement les employés par la raison simple qu'en téléphonie, au contraire de ce qui se passe en télégraphie, le public est pour une part à lui-même son employé (et il faut bien admettre que parfois des difficultés viennent des abonnés eux-mêmes), ensuite parce que jamais les appareils automatiques, personne n'a de doute à ce sujet, ne pourront satisfaire à certains besoins, par exemple à l'établissement de communications interurbaines (1). Quoi qu'il en soit, le problème est tentant, et diverses solutions ont été données pour l'automaticité des manœuvres de mise en communication. Dans la pratique, un assez grand nombre de postes ont été établis pour des abonnés groupés par 2, 5 et jusqu'à 10, désirant n'employer qu'une même ligne vers un poste central commun et communiquer entre eux ; ce sont, si l'on veut, de petits postes centraux secondaires. Mais de postes centraux dans le sens où nous l'entendons en ce moment, le nombre est minime. Presque tous, sinon tous, parmi les plus importants, sont munis d'un des commutateurs dérivés par perfectionnements successifs d'une invention faite, en 1889 environ, par M. Almon B. Strowger. Si mes souvenirs sont exacts, la manœuvre du poste d'abonné est restée ce qu'elle était dès le début ou tout au moins il y a une dizaine d'années ; voici en quoi elle consiste. Le poste

(1) A Grand Rapids (Michigan, États-Unis), lors du remplacement du commutateur manuel par un commutateur automatique, on conserva 48 téléphonistes sur 145, soit un tiers.

d'abonné (*fig.* 12) comprend un disque métallique mobile autour du centre et portant sur la moitié du pourtour dix trous correspondant aux dix chiffres 0, 1, 2, ..., 9 : si l'on veut appeler un abonné, l'abonné 61854 par exemple, on placera l'index dans le trou numéroté 6, et l'on fera tourner le disque dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à ce que le doigt rencontre un butoir : on le retire alors et on laisse le disque revenir, sous l'action d'un ressort, à la position de repos ; puis on recommence pour le chiffre 1, puis pour le chiffre 8, pour le chiffre 5 et pour le chiffre 4. Les rotations partielles successives du disque ont eu pour effet de mettre en mouvement, au poste central, de petits frotteurs reliés les uns après les autres à la ligne appelante et opérant pour ainsi dire d'abord la sélection des diaines de mille, puis celle des milliers, puis celle des centaines, puis celle des dizaines et enfin celle des unités. A ce moment la ligne appelante est en communication avec la ligne 618 54, et l'abonné peut sonner son coabonné n° 61854. Évidemment la manœuvre est pour les abonnés moins simple et moins prompte que celle de tout à l'heure, consistant à décrocher le téléphone ; mais il faut bien se dire que, dans tout système où l'on fera disparaître l'opérateur, il en sera de même sous une forme ou sous une autre ; la sélection de la ligne désirée qui était, sur ordre verbal, opérée par la téléphoniste, devra être effectuée directement par le demandeur à l'aide de procédés mécaniques. Les systèmes automatiques dont je parle ne sont, à ma connaissance, représentés en Europe que par un bureau de Berlin desservant aujourd'hui, si je suis bien renseigné, 60 à 65 abonnés. Aux États-Unis, on a été beaucoup plus loin et l'on trouve des bureaux automatiques prévus pour 6.000 et 10.000 abonnés. Il n'en est pas moins vrai que, même aux États-Unis, le nombre d'abonnés usant d'un poste central automatique est très faible par rapport à ceux desservis manuellement. Le Rapport statistique récemment publié par le Ministère du Commerce et du Travail indique en effet, au 1er jan-

Fig. 12.

vier 1903, 54 commutateurs du premier genre (Strowger ou autres) contre 10.842 du second. Il est toujours difficile de prévoir l'avenir d'un groupe de procédés; bien que celui des commutateurs automatiques n'apparaisse pas nettement pour le moment, ce genre de commutateurs ne pouvait être passé sous silence.

Complément d'équipement d'un poste central. — Pour en revenir aux notions plus générales, il me faut, en ce qui concerne les postes centraux, attirer votre attention sur ce fait que le commutateur en lui-même, fût-ce un multiple de 20.000, comme à Budapest, ne forme qu'une portion de l'équipement d'un poste central; d'une part, en effet, il comporte des annexes immédiates, et, d'autre part, pour y obtenir ainsi que chez l'abonné la simplicité et la précision de manœuvres que nous avons vues, il faut créer au voisinage de la salle de manipulation, dont il forme à peu près le seul meuble, une série d'autres salles, d'autres départements. Toute pile ayant été supprimée chez l'abonné, nous en retrouvons l'équivalent au bureau central; une salle d'accumulateurs, les uns en service, les autres de rechange, doit fournir les courants nécessaires aux microphones, aux relais, aux lampes : à côté nous aurons une salle de machines dynamo-électriques pour la charge des accumulateurs, les courants d'appel, l'éclairage des locaux; ces machines électriques seront actionnées par des moteurs à gaz ou à vapeur; il faudra actionner aussi des ventilateurs pour envoyer, au moins dans la salle de manipulation, de l'air purifié, frais en été, chaud en hiver, humidifié au degré voulu pour une respiration normale : bref, c'est une usine entière à installer. La poussière sur les jacks, les clefs, etc., étant un des principaux obstacles à de bonnes communications, on établit en outre des vestiaires séparés, afin que le personnel n'introduise dans la salle de manipulation ni la poussière de l'été, ni la boue de l'hiver, qui se résoudrait elle aussi en poussière. Par ailleurs il est de bonne administration de mettre à la disposition du personnel, comptant parfois plusieurs centaines de téléphonistes, une salle de repos, une autre salle où l'on puisse faire réchauffer quelques vivres apportés du logis, etc. : ce ne sont pas là seulement des éléments de confortable offert au personnel dans un esprit de patronage éclairé, c'est une facilité réservée à la direction de mieux combiner les heures de service, mieux organiser et mieux employer les brigades. Pour la correction et la rapidité du service, pour l'économie d'installation dont les conditions se trouvent heureusement les

mêmes, on doit exiger du personnel un travail soutenu, méthodique, actif; par contre, et peut-être serait-il mieux de dire par suite, il convient de ménager aux téléphonistes un repos franc, lorsque l'allure du trafic et l'organisation permettent d'interrompre ce travail pour une partie d'entre elles; or le repos ne saurait être pris dans la salle de manipulation, ce n'en est pas le lieu; il doit l'être ou chez soi, ou dans une dépendance du bureau, qu'on rendra confortable si faire se peut.

Quant aux annexes du commutateur multiple auxquelles je faisais tout à l'heure allusion, je me contenterai de vous signaler en particulier : 1° un *répartiteur d'entrée*, gros bâti formant commutateur, auquel arrivent d'une part les fils de ligne, d'autre part les câbles de multiple, et grâce auquel, à travers leurs changements de domicile, c'est-à-dire de lignes, on conserve aux abonnés leur numéro d'appel, leur numéro de jack général (ou leur numéro de standard dans les postes secondaires); 2° un *répartiteur intermédiaire* destiné à maintenir d'année en année, entre les diverses téléphonistes, l'équilibre de travail que tend constamment à rompre la variation dans le nombre des appels émanés de tels ou tels abonnés, en raison du changement d'allure de leur industrie ; 3° un bâti pour les relais : ce sont là des meubles considérables. Je passe sous silence d'autres accessoires dont je ne pourrais faire mention sans vous donner des explications trop longues. Quelques données de construction achèveront de vous fixer sur l'importance de ces ensembles que constituent les grands bureaux téléphoniques : pour prendre celui qui se trouve plus près de nous, l'hôtel des Téléphones dit de la rue Gutenberg, à Paris, comprenant quatre étages et un sous-sol, a 63 mètres de long y compris les grosses rotondes qui le terminent, avec quatre salles principales de 60 mètres sur 10 mètres en nombres ronds, 5 mètres à peu près de hauteur sous plafond et un sous-sol égal, mais moins élevé ; l'hôtel des Téléphones de Bruxelles, rue de la Paille, mesure 60 mètres de longueur, 22 mètres de largeur.

Nous venons d'étudier le poste central, d'en percevoir la complexité, d'en saisir assez pour nous rendre compte de la délicatesse que présente, même dans le cas simple d'un réseau implicitement supposé doté d'un bureau unique, ce problème de la mise en communication qui est présentement le problème critique de la téléphonie. Mais, si le poste central représente le point constamment dangereux du service, il n'en est pas, malgré la masse de matériel qui y est

accumulée, l'instrument le plus dispendieux à établir : l'outil le plus cher à créer, c'est la ligne.

Ligne. — Dans les régions téléphoniquement peu denses, il faut aller chercher chaque abonné par une ligne souvent aérienne et néanmoins relativement coûteuse, dont les appuis sont mal utilisés en raison du petit nombre de conducteurs supportés ; quand il s'agit, comme appuis, d'emprunter les immeubles privés, on doit compter en outre sur l'indemnisation des propriétaires; même dans les pays où la législation présente déroge au principe général de l'expropriation que toute diminution forcée de jouissance de la propriété privée, fût-ce pour cause d'utilité publique, doit être payée, il est prudent de ne pas s'y fier, le retour aux principes pouvant se produire d'un moment à l'autre. Dans certains cas, la voie publique même peut n'être occupée qu'à titre onéreux. Si, maintenant, des districts à faible densité téléphonique nous revenons vers les postes centraux, nous constatons en général que peu à peu les lignes aériennes se transforment en lignes souterraines. Dans certaines villes, le réseau presque entier est souterrain. Ici nous ne devons pas nous laisser illusionner par le cas de Paris : l'admirable réseau d'égouts dont nous jouissons est unique au monde, et, s'il permet d'installer sans de trop grands frais un réseau de conducteurs téléphoniques, il ne faut pas oublier que, dans l'immense majorité des cas, on ne rencontre rien de semblable et que, pour les grands réseaux, la création de canalisations souterraines devra être achetée au prix de travaux dispendieux. Sans aller bien loin, nous en trouverons la preuve à Bruxelles et à Londres, qui viennent d'être dotées de beaux réseaux souterrains : les projections qui vous sont faites montrent le bouleversement qu'il fallut introduire dans les voies publiques de ces deux villes, aussi bien au voisinage du gracieux square des Métiers de la première que sur le célèbre pont de Londres avec son intense circulation. Vous voyez là deux genres de canalisations. C'est qu'en effet les canalisations ne sont pas partout les mêmes, et l'on peut ajouter que, sur ce point comme sur les autres, bien des tâtonnements ont pris place, allant de l'égout, sur le radier duquel les conducteurs arrangés en câbles sont simplement déposés, jusqu'aux conduits dont la photographie vient de passer sous vos yeux. On est à peu près unanime aujourd'hui à réserver pour chaque câble un conduit particulier, et ce n'est guère que sur les divers modes d'application de ce principe que s'exerce présentement

l'esprit d'invention. Vous avez vu dans la section suédoise (Palais des Machines), à l'Exposition de 1900, les blocs en ciment moulé, forés de trous cylindriques en nombre variable suivant le nombre de câbles prévus, exposés par M. Axel Hultman ; on cimente ces blocs bout à bout et l'on constitue ainsi une grosse canalisation percée de part en part de trous cylindriques réguliers; un système semblable est en usage à Saint-Pétersbourg. Au pont de Londres, au contraire, vous trouvez de longs tubes en fer à emboîtement; une solution de ce genre peut être seule acceptable, si l'on a, d'une part, de longues lignes droites ou très faiblement incurvées et, d'autre part, peu d'épaisseur sous pavage. Comme solution générale, celle qui présente le plus de souplesse est celle qui, après avoir fait ses preuves aux États-Unis, a été adoptée par l'Administration belge des Télégraphes et, avec de légères modifications, pour la majeure partie du réseau de Londres. L'élément primaire (*fig.* 13) est un petit prisme en grès vitrifié, imperméable par conséquent ainsi que non conducteur et chimiquement inerte, de 45^{cm},5 environ de long, à section extérieure carrée de 11^{cm},43 de côté avec angles abattus, et perforation centrale de 7^{cm},6. A l'aide de ces prismes très maniables, on construit comme avec des briques, dans le fond de tranchées convenables, de longs petits massifs de maçonnerie, de longues murettes, où les prismes disposés dans le prolongement les uns des autres fournissent les conduits dans chacun desquels on tirera plus tard un câble : le nombre de câbles à prévoir détermine le nombre de prismes juxtaposés et empilés.

Fig. 13.

Dans tous les systèmes de canalisations souterraines, à intervalles variables résultant du genre de câbles à introduire et du profil de la ligne, on interrompt la conduite par des regards, des trous d'homme, petits caveaux en sous-sol maçonnés soigneusement, où la conduite débouche de ses deux ou trois ramifications par des séries de trous qui ne sont autre chose que les orifices des conduits élémentaires.

Les câbles qu'on y introduit se présentent sous forme de tubes de plomb; mais le rôle de ces tubes est simplement de protéger le câble véritable placé à l'intérieur : celui-ci est essentiellement formé de conducteurs en cuivre de haute conductibilité isolés (pratiquement à l'aide

de papier) l'un de l'autre et de l'enveloppe de plomb, légèrement tordus deux par deux, les paires de conducteurs ainsi constituées étant enroulées par couches successives, suivant des hélices à pas allongé. Chacun des détails que je viens d'indiquer a sa raison d'être. Le cuivre, de haute conductibilité, est choisi de façon à réduire, sous un volume déterminé, la résistance du circuit de ligne au minimum possible. L'isolement au papier, vu la porosité de cette matière, peut être considéré en grande partie comme un isolement mécanique où la cellulose joue surtout le rôle de cale, de séparateur continu, permettant l'isolement électrique par l'air inclus dans les pores ou entourant l'ensemble. Le cordelage des paires de conducteurs met les circuits métalliques correspondant à chacune d'elles à l'abri des influences électriques extérieures au circuit ou, plus exactement, opère sur celui-ci la compensation des influences perturbatrices s'exerçant sur chacun des deux fils élémentaires de la paire ; c'est par là qu'on évite en particulier l'audition, sur un circuit, de la conversation échangée par un circuit voisin ; la nécessité pour une conversation correcte d'employer deux fils et de les faire alterner de position a été signalée, en 1879 (1), par M. Hughes, qui avait, sur le désir de l'Administration des lignes télégraphiques de France, entrepris, dès 1868, une série d'expériences pratiques dans le but de remédier aux inconvénients de l'induction mutuelle entre circuits télégraphiques et, comme je l'ai dit en commençant, le réseau téléphonique souterrain de Paris a été depuis l'origine établi sur ce principe : pour les lignes aériennes, on a résisté longtemps à l'obligation d'alterner les positions ; dans certains réseaux, on a même nié l'utilité des circuits bifilaires ; aujourd'hui l'on peut dire que toutes les oppositions ont disparu et, dans les cas où le circuit bifilaire n'est pas encore adopté, c'est le résultat pur et simple de la situation financière : quant à l'équivalence de la position moyenne de chaque fil d'une paire vis-à-vis des influences extérieures, on l'assure maintenant toutes les fois qu'un circuit bifilaire aérien est un peu long.

Enfin l'enveloppe de plomb qui, par soudures aux raccords des sections successives, est rendue continue d'un bout à l'autre, maintient le câble intérieur à l'abri de l'humidité. Ce point est capital. L'air sec est le meilleur des diélectriques pour les conducteurs

---

(1) Voir *Annales télégraphiques*, 1879, pp. 165 et 209 ; — *Journal of the Society of Telegraph Engineers*, 1879, p. 163.

affectés aux transmissions téléphoniques, parce qu'il est celui donnant le plus haut isolement et la plus basse capacité, qualités capitales pour une bonne transmission. Mais, dès que la siccité en disparaît, ces qualités disparaissent en même temps : de plus, quand, par accident quelconque, l'humidité devient trop forte, le papier toujours plus ou moins hygrométrique crée des dérivations, des mélanges selon l'expression usitée, entre les fils du câble. Comme on ne peut admettre que jamais un accident ne se produira, c'est une des objections qu'on faisait il y a un certain temps aux gros câbles sous papier, par ailleurs si avantageux : d'une part, la moindre piqûre au tuyau de plomb devait faire tomber instantanément l'isolement à cause de l'emploi du papier au lieu de gutta-percha, caoutchouc, etc., et, d'autre part, l'accumulation d'un grand nombre de circuits sous la même enveloppe de plomb, tout appréciable qu'elle fût au point de vue du prix de revient, entraînait en cas de dérangement la mise hors service de tous ces circuits. Pour atténuer partiellement ces inconvénients ou plutôt pour en limiter le développement, on avait adopté la précaution de verser, en usine ou après pose, aux deux bouts de chaque longueur de câble, de la paraffine fondue qui, en se refroidissant, formait bouchon : dès lors, quand une section devenait mauvaise, les autres étaient protégées contre l'invasion de l'humidité. Il n'en est pas moins vrai que la seule ressource était de relever la longueur de câble défectueuse et de la remplacer par une autre ; pareille opération, en dehors des dépenses qu'elle occasionne, est toujours un élément de trouble pour le service. En réalité, les accidents de ce genre sont relativement peu fréquents dans les canalisations de poterie, de ciment ou de fer dont nous avons parlé. Quant aux câbles dont on peut atteindre les parties défectueuses sans enlever au préalable la section endommagée (câbles aériens, auxquels la cherté des canalisations souterraines oblige à recourir assez souvent encore, câbles en égouts du réseau de Paris, câbles sous tunnels, comme ceux récemment posés à Chicago, etc.), la difficulté a été entièrement levée depuis longtemps déjà, depuis 1893, par une méthode simple et très efficace appliquée à cette époque par M. l'ingénieur Barbarat à la réparation sur place des câbles téléphoniques de Paris. Elle a donné toute satisfaction et se répand graduellement hors de France ; en voici le principe. Le câble, obturé aux deux bouts, est muni, à l'extrémité placée au poste central, d'une tubulure normalement fermée par un bouchon à vis, mais qu'on peut mettre, à travers un

dessiccateur convenable, en relation avec un réservoir d'air comprimé; à l'extrémité éloignée du poste central, il porte une autre tubulure plus petite, bouchée elle aussi en temps ordinaire; aucun tampon de paraffine ni d'autre matière n'est laissé dans le câble; les enveloppes en plomb des différentes sections étant soudées les unes aux autres, on a donc un tube continu sans aucune cloison intérieure. Supposons cette enveloppe rompue en un point quelconque par corrosion, piqûres d'insectes, négligence d'un égoutier accrochant sa lampe au câble; l'humidité ambiante, peut-être de l'eau, y pénétrera; il suffira, pour remettre le câble en état, de chasser cette humidité ou cette eau après avoir bouché le trou et au besoin rétabli le papier qui doit séparer les fils; on effectuera d'abord cette partie mécanique du travail, puis on introduira l'air sec dans le câble par la tubulure du poste central, tout en débouchant la petite tubulure de l'autre extrémité; l'air sec passant alors d'un bout du câble à l'autre enlèvera l'humidité qui s'y trouve emprisonnée et restaurera promptement le câble en son état premier : un exemple numérique précisera les idées; je le prends dans les expériences qui ont précédé et décidé l'adoption du procédé [1] : une bobine de câble à 51 paires de conducteurs sous papier, de 175 mètres de long, présentait un isolement de 256 mégohms entre la masse des conducteurs réunis et l'enveloppe de plomb; après trois heures de passage d'air sec à la pression de 1 kg, l'isolement était monté à 2.270 mégohms. Vous voyez qu'on peut employer sans crainte les câbles sous papier; vous comprendrez aussi que, vu leurs qualités électriques, on ait cherché à en développer l'usage et qu'on ait graduellement augmenté le nombre des conducteurs pour réduire le prix de chaque circuit posé : on est arrivé successivement aux câbles à 124 paires, 200 paires, 300 paires; on a été jusqu'à 600 paires.

Développement du service. — Au cours de notre revue très rapide, vous avez probablement deviné, à côté de telle ou telle question, l'existence de mainte autre dont le manque de temps ne permettait pas l'examen : il en est bon nombre, en effet, que j'ai dû négliger; pour en citer deux ou trois, je me suis tu sur la question complexe de la singularité ou de la pluralité des bureaux dans un même lieu, sur les communications interurbaines, sur les modes de taxation. Mais je veux essayer, en terminant, de vous montrer le chemin par-

---

(1) *Annales télégraphiques*, mai-juin 1894, p. 216.

couru en vingt-cinq ans ; un petit nombre d'exemples numériques y suffira sans doute. Je les extrais en partie des renseignements officiels fournis au *Journal télégraphique international* de Berne [1] par les diverses administrations ; pour les États-Unis, où l'initiative privée, seule en jeu, a manifesté son habituelle fécondité et dont les statistiques, s'appliquant à un pays unique de 75 à 80 millions d'âmes, présentent plus de chances d'homogénéité que celles provenant de nations différentes, les données sont presque toutes empruntées au rapport sur les téléphones et les télégraphes dont j'ai déjà parlé.

Le 31 décembre 1902, les réseaux *urbains* comprenaient, en kilomètres de *fils :*

PAYS	FILS AÉRIENS en service	FILS SOUTERRAINS en service	FILS SOUTERRAINS plus : en réserve	FILS SOUTERRAINS plus : soit 0/0	EXPLOITANT
Allemagne	401.273	375.474	266.120	70,8	Etat.
Belgique	50.635	28.419			Etat.
Danemarck	53.085	30.925	13.991	45	Compagnies privées
France	81.773	201.836	100.367	49	Etat.
Grande-Bretagne et Irlande	727.876				Compagnie privée (National Telephone C°).
Norvège	52.409	16.106	12.300	76	Etat. Compagnies privées
Suède	112.078				Etat. Compagnies privées. Sociétés mutuelles d'habitants.
Suisse	44.662	124.429			Etat.

Il convient d'ajouter que le développement de *fils*, en kilomètres, du réseau aérien interurbain était : Allemagne, 188.493 ; Belgique, 17.502 ; Danemark, 26.696 ; France, 157.839 ; Norvège, 47.172 ; Suisse, 19.541. Aux États-Unis, l'ensemble des réseaux urbains et interurbains renfermait 7.786.282 kilomètres de conducteurs, tant aériens que souterrains.

[1] *Journal télégraphique, publié par le Bureau international des Administrations télégraphiques*, 1904, p. 152 et seq. : Statistiques des communications téléphoniques, année 1902.

Au 31 décembre 1902, nous trouvons en France 2.323 réseaux téléphoniques (dont les plus importants comptaient, en nombres ronds, au 1er janvier dernier : Paris, 36.100 abonnés; Lyon, 3.100; Marseille, 3.000; Bordeaux, 2.500; Lille, 1.350; le Havre, 1.100; Rouen, 1.000); en Allemagne, 3.692; en Belgique, 17; en Danemark, 79; en Norvège, 201; en Suède, 180; en Suisse, 330.

Le nombre des postes d'abonnés était de 388.741 pour l'Allemagne, 19.765 pour la Belgique, 38.514 pour le Danemark, 94.350 pour la France, 246.092 pour la Grande-Bretagne et l'Irlande (National Telephone C°), 35.481 pour la Norvège, 94.101 pour la Suède, 45.745 pour la Suisse, 2.224.066 pour les États-Unis, 48.481 pour le Canada (Bell Telephone C°); l'Allemagne possédait en outre 19.081 cabines publiques, la France 3.515 et les États-Unis 91.231.

Les conversations urbaines entre abonnés ou entre abonnés et cabines publiques s'élevaient, pour l'année 1902, en Allemagne à 727.465.567, en Belgique à 36.467.350, en Danemark à 67.862.000, en France à 176.755.741, en Grande-Bretagne et Irlande (National Telephone C°) à 840.000.000 environ, en Norvège à 75.692.055, en Suède à 162.508.500, en Suisse à 23.242.737, aux États-Unis à 4 milliards 950 millions. Ces totaux formidables prennent une signification plus nette si on les rapproche de ceux fournis par le trafic télégraphique, avec lequel l'esprit est mieux familiarisé ; c'est ainsi que, dans le réseau téléphonique de Paris, il doit, en ce moment, s'échanger chaque jour à peu près trois fois plus de conversations qu'il n'y a de télégrammes reçus ou transmis au Poste central des télégraphes : quant aux 4 milliards 950 millions de conversations locales des États-Unis, comparés aux 91.650.000 télégrammes privés transmis sur le territoire de l'Union dans la même période, ils représentent un échange 54 fois plus actif de communications : au lieu de 3 fois et 54 fois, on devrait même dire 6 et 108 fois respectivement, puisqu'il s'agit de comparaison avec des télégrammes et que chaque conversation téléphonique correspond non pas à un message, mais à deux au moins (demande et réponse); une conversation est au minimum l'équivalent de deux télégrammes, un dans chaque sens.

Considérés séparément, les nombres absolus ne prennent d'ailleurs pas leur vraie valeur, et l'on doit être circonspect en en tirant des conclusions : considérons la Norvège; avec ses 35.481 postes d'abonnés, elle ne semble pas en très bonne place; si nous rapprochons

ces 35.481 postes du nombre des habitants, elle apparaît au contraire la seconde des nations européennes. La proportion entre le nombre des abonnés et la population est très intéressante au point de vue de l'extension relative de la téléphonie; voici le nombre d'abonnés par 100 habitants dans les divers pays (la population admise est celle indiquée par le recensement de 1900-1901) : 0,78 en Allemagne ; 0,29 en Belgique ; 1,55 en Danemarck ; 0,24 en France ; 0,59 en Grande-Bretagne et Irlande ; 1,58 en Norvège ; 1,83 en Suède ; 1,38 en Suisse ; 2,92 aux Etats-Unis ; 0,90 au Canada (Bell Telephone C°). Peut-être rendrait-on les comparaisons plus claires en considérant la proportion inverse et disant par exemple qu'il existe aux États-Unis 1 poste téléphonique par 34 habitants et 1 pour 413 en France. On ne peut s'empêcher de noter que, réserve faite de la Suisse, les six pays où la téléphonie est proportionnellement la plus répandue sont ceux où fonctionne l'industrie privée, seule ou en coexistence avec l'industrie d'Etat.

Pour se rendre compte de l'avenir promis à la téléphonie, il suffit de jeter les yeux sur cette courbe (*fig.* 14) représentant, de 1881 à 1905, en ce qui concerne la plus grosse compagnie des États-Unis, le nombre de postes d'abonnés au 1er janvier de chaque année. Jusqu'en 1896 à peu près, l'accroissement, bien que satisfaisant, a été relativement lent : à partir de ce moment, l'utilité du téléphone est de plus en plus appréciée, la progres-

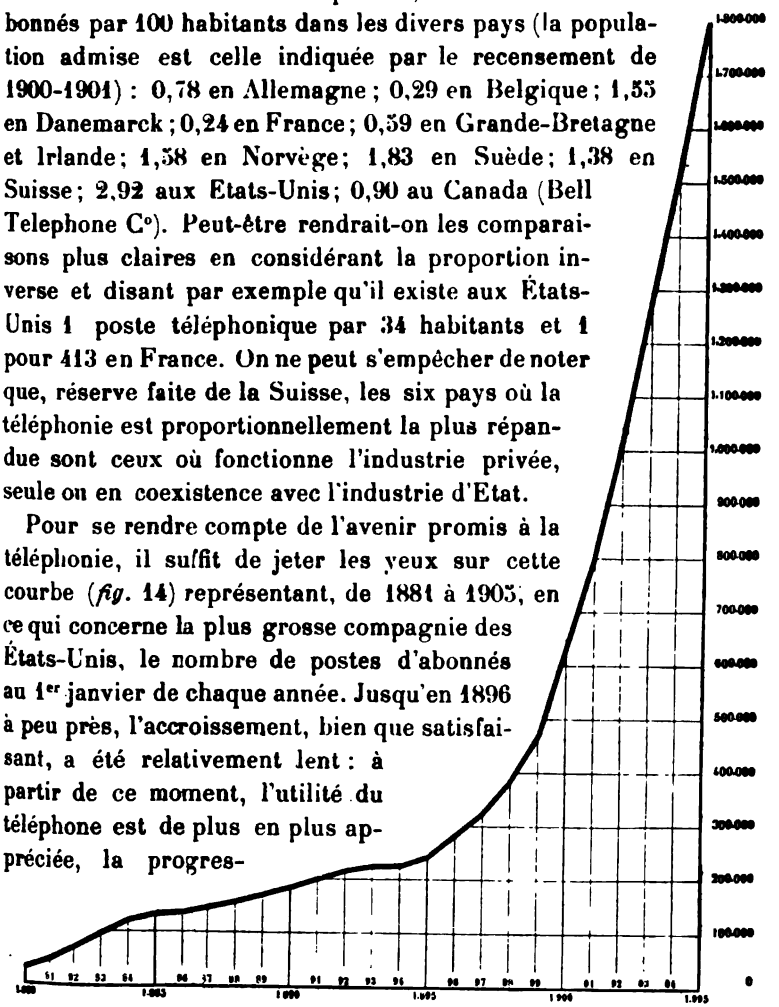


Fig. 14.

sion devient presque inquiétante ; en dehors de l'avantage présenté par l'agrégation à des réseaux déjà importants, cette progression tient à trois causes principales : le perfectionnement du matériel,

l'adoption de systèmes de taxation plus souples, enfin la cohésion communiquée au service par des règlements et un entraînement du personnel plus parfaitement coordonnés.

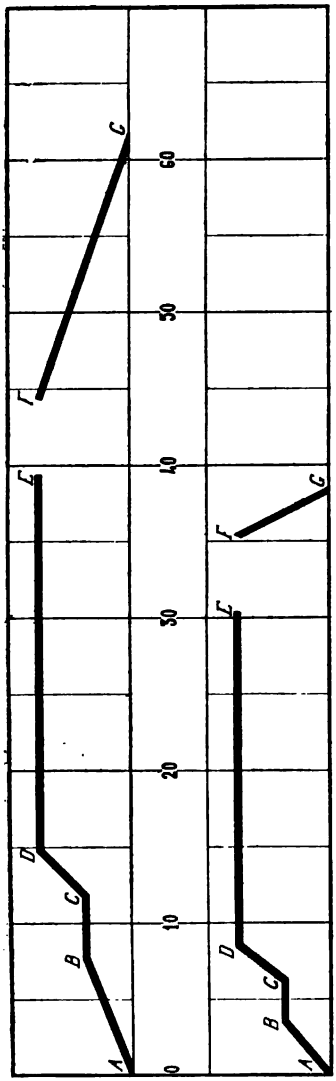


Fig. 15.

Le développement ne se poursuivra pas indéfiniment à pareille allure, cela est évident; mais il est considéré comme pouvant être, sans difficulté spéciale, poussé dans les villes jusqu'à atteindre 10 0/0 de la population : des ingénieurs compétents envisagent même comme probable d'ici à une quinzaine d'années une proportion de 15 à 20 0/0 dans les villes principales : on prévoit un million de postes d'abonnés à New-York en 1920.

Sera-t-il possible alors de parer convenablement aux nécessités du service? Sera-t-il possible de conserver à celui-ci l'efficacité aujourd'hui atteinte dans les réseaux bien outillés et bien desservis? La mission incombant aux entreprises deviendra terriblement délicate ; mais le succès obtenu jusqu'ici permet la confiance. Il y a une dizaine d'années, le problème eût été jugé aussi ardu d'assurer un bon service dans un réseau de 177.000 postes d'abonnés, comme est présentement celui de New-York, accru en cinq ans de 100.000 stations. Les efforts combinés de tous, ingénieurs des compagnies et constructeurs, l'étude persévérante et minutieuse des divers éléments du service l'ayant résolu, nous pouvons compter que l'avenir nous apportera encore en temps voulu les solutions utiles. Les graphiques que vous avez sous les yeux (*fig.* 15), et qui traduisent l'état

de choses dans ce réseau, vous feront, je le suppose, partager ce sentiment. Ils représentent l'histoire, pour ainsi dire, d'une conversation entre abonnés d'un même bureau, d'une part avec les multiples d'ancien système à annonciateurs, d'autre part avec les multiples modernes à batterie centrale et signaux lumineux. Les tracés ont été obtenus de la manière suivante : on a pris l'axe des x pour axe des temps ; ceux-ci sont exprimés en secondes ; chaque segment de droite correspond à une opération, chaque brisure au commencement ou à la fin de l'opération : le temps o est celui où paraît le signal d'appel. Les valeurs numériques des temps sont les moyennes des temps chronométrés au cours de centaines de pointages faits dans des bureaux centraux différents ; la ligne brisée supérieure concerne le service des multiples à annonciateurs, l'inférieure celui des multiples actuels à batterie centrale et lampes [1]. Nous voyons qu'il s'écoule [2] :

Courbe inférieure (batterie centrale et lampes)		Courbe supérieure (annonciateurs)
3",5	entre le signal d'appel initial et l'achèvement de l'insertion de la fiche (Segment AB).....	7",7
2",69	pour recevoir et collationner le numéro demandé (Seg. BC).....	4",05
2",26	pour faire l'essai de la ligne demandée, insérer la fiche d'appel, commencer à sonner le demandé (Seg. CD).....	3",02
21",84	pour que le demandé réponde (Seg. DE).....	24",58
3",08	entre le moment où paraît le signal de fin (fonctionnement de l'annonciateur ou allumage des 2 lampes de surveillance) et celui où la communication est rompue (Seg. FG).....	17",1

Afin de raccourcir les diagrammes, j'en ai retranché la portion correspondant à la conversation et l'ai simplement rappelée par l'interruption EF : c'est un élément à peu près constant ; la constance de l'un à l'autre n'est peut-être pas rigoureuse, parce qu'en général les abonnés manœuvrent d'autant plus vite et causent d'autant plus brièvement que par ailleurs le service est lui-même plus prompt ;

---

(1) Un diagramme analogue donné jadis (*Annales télégraphiques*, 1894, p. 12) et indiquant, comme les deux présentement en cause, des résultats très favorables, n'a pas tout à fait la même valeur ; les pointages y relatifs, en nombre restreint, venaient d'un seul bureau, le service en outre étant alors (fin de 1893 ou commencement de 1894, si je ne me trompe) moins chargé et les méthodes de pointage étant moins complètes qu'aujourd'hui.

(2) H.-L. Webb, Telephone Traffic, *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, May 11 th 1895, p. 295.

mais la différence est généralement faible : on peut admettre une durée de 105 secondes sans s'écarter beaucoup de la réalité.

La comparaison des deux tracés mettrait en évidence quelques particularités intéressantes ; nous n'en retiendrons que deux, sans du reste entrer dans l'examen des causes : 1° entre le commencement de l'appel par le demandeur et celui de l'appel du demandé, le délai est 72 0/0 plus long dans l'ancien système que dans le nouveau (j'ajoute que, pour une communication renvoyée d'un bureau origine à un bureau destinataire, le temps en question est majoré de 5″,58 dans l'ancienne exploitation et de 2″,37 dans la nouvelle) ; 2° le temps employé à la rupture de la communication est au moins 5 fois plus long. Ou encore, ce qui résume mieux la situation, le temps consacré aux opérations du poste central est, dans un cas, plus du double et près du triple de ce qu'il est dans l'autre : d'où, avec les nouveaux systèmes, économie de premier établissement, économie d'exploitation.

Il me paraît inutile d'insister davantage. Le coup d'œil que nous avons jeté ensemble sur l'état actuel de la téléphonie suffit à faire discerner la multiplicité des problèmes déjà posés par cette industrie née d'hier, la multiplicité des problèmes déjà résolus. Je ne veux cependant pas que mes dernières remarques vous laissent sous une impression fausse. Elles ont porté sur la comparaison de deux systèmes, et, si je devais faire ressortir la très nette supériorité de l'un sur l'autre, il n'en résulte aucunement que l'un des deux soit mauvais ; les données mêmes de la comparaison entraînent la conclusion contraire : la « batterie centrale » prévient des erreurs, évite des hésitations, imprime au service une allure beaucoup plus franche, en accroît dès lors très sensiblement la valeur : il n'en reste pas moins qu'on a tiré pendant des années un parti remarquable du matériel qui l'a précédée ; sonner le demandé 14″,77 après l'apparition du signal d'appel du demandeur et rompre la communication 17″,10 après le signal de fin est vraiment excellent. Il ne faut pas perdre de vue non plus, et c'est le second point sur lequel je voulais vous mettre en garde, que, dans l'un et l'autre cas, ces très bons résultats n'ont pu être obtenus que par un entraînement judicieux du personnel et une pleine coopération de tous vers le but final ; dans cette branche de l'activité humaine comme dans les autres, la méthode et la discipline sont souvent les outils presque déterminants du succès.

LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DE LA PYRRHOTINE;

Par M. Pierre WEISS [1].

INTRODUCTION.

On ne rencontre guère, parmi les substances ferromagnétiques, elles-mêmes peu nombreuses, que deux corps bien cristallisés, la magnétite et la pyrrhotine. Une étude faite il y a quelques années [2] sur la magnétite m'a fait entrevoir toute la nouveauté des aperçus que l'on pouvait tirer de la considération simultanée des phénomènes magnétiques et de la structure cristalline. La plupart des recherches physiques sur les métaux magnétiques ont été faites, en effet, en ne considérant dans la matière qu'une seule direction privilégiée qui est, ou est censée être, à la fois celle de l'aimantation et celle du champ. Et les observations faites sous l'empire de cette conception linéaire du magnétisme ont été cataloguées dans un nombre considérable de courbes, auxquelles on ne rattache, en général, aucune tentative d'analyse des phénomènes.

Pour aborder le problème à trois dimensions qu'est réellement le magnétisme, il faut s'adresser non à des matières possédant la fausse isotropie des métaux usuels, à structure grenue, fibreuse ou lamellaire, formés le plus souvent de cristaux microscopiques enchevêtrés et ne pouvant donner que des moyennes indéchiffrables de phénomènes magnéto-cristallins, mais à des cristaux homogènes dans toute leur étendue, pour revenir, s'il est possible, des résultats plus simples qu'ils auront donnés aux propriétés des matières usuelles complexes.

A ce point de vue, l'étude de la pyrrhotine promettait, dès les premières expériences qui ont fait découvrir son plan magnétique, d'être particulièrement féconde. Le présent mémoire est consacré à l'exposé et la discussion de l'ensemble des résultats acquis sur cette substance.

---

(1) Séance du 28 avril 1905.

(2) P. WEISS, *Ecl. électr.*, t. VII, p. 487; t. VIII, p. 56, 105; 1896; — *J. de Phys.*, 3e série, t. V, p. 435; 1896.

CHAPITRE I [1].

A. — *Description de la pyrrhotine.*

La pyrrhotine est un sulfure de fer de composition voisine de celle du protosulfure FeS, avec un excédent de soufre jusqu'à présent inexpliqué et qui n'est peut-être pas absolument constant. Citons deux analyses qui se rapportent à des substances de même origine que celles qui seront étudiées :

	Composition centésimale	
	S	Fe
Protosulfure FeS	36,39	63,61
Pyrrhotine de Bodenmais (Rammelsberg)	38,83	61,17
Pyrrhotine du Brésil (Berthier)	37,38	62,62

La pyrrhotine contient fréquemment un peu de nickel.

On a proposé les formules Fe^7S^8, Fe^8S^9, $Fe^{11}S^{12}$, qui toutes peuvent rentrer dans les types :

$$nFeS + Fe^2S^3 \qquad \text{ou} \qquad nFeS + FeS^2.$$

La couleur varie du brun mat au bronze foncé.

La forme cristalline est considérée comme hexagonale par Romé de L'Isle et G. Rose. Ce dernier indique le rapport $a : e = 1,7402$. On rencontre fréquemment la base du prisme e (0001), ses faces latérales m $(10\bar{1}0)$ et un certain nombre de pyramides.

La structure de la matière est souvent feuilletée suivant e, G. Rose [2] remarque que ce n'est pas un clivage proprement dit.

J'ai trouvé pour la densité des substances que j'ai étudiées :

Pyrrhotine de Morro Velho.	d =	4,52 ; 4,58 ; 4,60 ; 4,605
— de Bodenmais..		4,41-4,43
— de New-Jersey..		4,56-4,59

Les deux dernières substances sont feuilletées ; on est donc exposé à trouver leur densité trop faible. La densité exacte, si tant est qu'elle est définie, doit être voisine de 4,60.

Streng [3], par comparaison avec la Sternbergite, émet l'hypothèse

---

(1) Une grande partie des renseignements de ce chapitre sont empruntés à Hintze, *Handbuch der Mineralogie*, t. I, p. 627.

(2) *Pogg. Ann.*, 74, 296 ; 1849.

(3) *N. Jahrbuch für Mineral.*, p. 797 ; 1878.

que la pyrrhotine pourrait être orthorhombique et doive son aspect hexagonal à un groupement de trois cristaux. Urba [1] confirme cette hypothèse par des mesures d'angles sur un cristal du Brésil. En 1882, Streng [2] revient de son opinion en concluant que, si les mesures d'angles ne donnent pas d'indications certaines, le clivage, les figures de corrosion et la conductibilité thermique indiquent nettement la forme hexagonale, « à laquelle les propriétés magnétiques ne contredisent pas ».

On obtient par l'acide chlorhydrique chaud des figures de corrosion dont les contours, absolument hexagonaux, sont fournis par des faces de pyramides du premier ordre.

Fizeau a trouvé pour le coefficient de dilatation parallèle à l'axe $2,35 \times 10^{-6}$, et pour le coefficient de dilatation perpendiculaire à l'axe $31,20 \times 10^{-6}$.

Les meilleurs cristaux pour les études magnétiques proviennent de Morro Velho, au Brésil ; ils sont souvent d'apparence parfaitement homogène dans une étendue de plusieurs centimètres. Ils ne sont pas clivables ; leur cassure conchoïdale a l'aspect d'un beau bronze foncé.

Par rapport aux propriétés magnétiques, douées d'une grande régularité, de cette première substance, que j'appellerai normale, les masses feuilletées provenant de Morro Velho, de New-Jersey et de Bodenmais présentent de nombreuses anomalies qui ont été l'objet d'une étude spéciale.

Enfin j'ai eu à ma disposition de petits cristaux de Schneeberg, dans le Tyrol, et des masses schisteuses de Norvège sur lesquelles je n'ai fait que peu de mesures ; leur examen ne semblait pas devoir ajouter aux résultats donnés par les autres substances.

B. — *Expériences magnétiques antérieures.*

Les pyrrhotines de diverses provenances sont inégalement attirables à l'aimant, on en rencontre qui ne sont pas magnétiques du tout.

Elles sont rarement magnétipolaires; cependant, sur un échan-

---

[1] *Groth's Ztschr.*, III, p. 190.
[2] *N. Jahrb. für Mineral.*, p. 183 ; 1882, 1.

tillon compact de Borév, Abt [1] a observé un champ coercitif voisin de 200 unités.

Streng [2] a fait sur la pyrrhotine des expériences magnétiques intéressantes qui contiennent en germe la découverte du plan magnétique, mais sont restées incomplètes parce qu'elles sont purement qualitatives et que le seul critérium de l'aimantation mis en œuvre est le magnétisme rémanent. Je résume brièvement ces expériences d'après Hintze (*loc. cit.*). Des tables parallèles à la base possédant primitivement des pôles faibles deviennent nettement magnétipolaires quand elles sont frottées avec un aimant et se comportent alors comme l'acier, en ce sens que le point où la touche commence prend un pôle de même nom, et celui où elle s'arrête un pôle de nom contraire à celui de l'aimant frottant. Par contre, une face taillée parallèlement à l'axe principal du cristal prend sur toute son étendue une polarité contraire à celle du pôle frottant la face opposée de la plaque, parallèle à la première, prenant du magnétisme de même nom que celui de ce pôle.

Streng ayant fixé un cube taillé suivant (0001) $(10\bar{1}0)$ $(11\bar{2}0)$ entre les pôles d'un électro-aimant puissant, l'axe de la pyrrhotine étant parallèle à l'axe de l'aimant, tenta ensuite d'examiner la polarité acquise en suspendant le cube dans une petite corbeille en papier, entre les pôles de l'aimant, dans la même position que dans l'opération précédente. Néanmoins, à la fermeture du courant, la substance se plaça toujours équatorialement, la direction perpendiculaire à l'axe cristallographique située dans la direction du champ devenant magnétipolaire.

Des résultats analogues furent obtenus avec un prisme de section carrée dont la longueur était parallèle à l'axe cristallographique. Après un essai d'aimantation dans le sens longitudinal, il était projeté violemment dans la position transversale. De même une plaque hexagonale parallèle à la base s'orienta toujours dans l'électro-aimant, l'axe se plaçant équatorialement.

Cette plaque suspendue, l'axe principal vertical avait perdu sa faculté d'orientation en ce sens que, tournée d'un angle quelconque, elle resta dans la nouvelle position dans laquelle elle avait été maintenue un instant.

---

(1) Abt, *Wied. Ann.*, LVII, p. 135; 1896; — Du Bois, *Rapports du Congrès international de Physique*, t. II, p. 481.

(2) Streng, N. *Jahrbuch für Mineralogie*, p. 183; 1882, 1; — Hintze, *Handbuch der Mineralogie*, t. I, p. 627.

Un cylindre bas, obtenu en arrondissant cette plaque, montre aussi l'équivalence de toutes les directions perpendiculaires à l'axe principal et ne manifeste aucune polarité dans le sens de cet axe.

Toutes ces expériences en partie étranges s'expliquent aisément par les résultats du présent travail, qui les confirme, sauf en ce qui concerne l'isotropie magnétique dans le plan de base du prisme. Nous verrons que la symétrie de la substance est tout au plus orthorhombique.

CHAPITRE II.

APPAREILS ET MÉTHODES D'OBSERVATION.

A. — *Expériences d'induction.*

Les premières expériences ont été faites avec le galvanomètre balistique. La substance *p* (*fig.* 1, 2 et 3), sous forme d'une sphère et plus tard d'un disque, se trouvait entre les pôles d'un aimant NS. Elle était fixée à la plate-forme d'un goniomètre, munie d'une alidade, tandis que les bobines induites *b*, *b'* étaient portées, au moyen d'un système de pièces de laiton, par l'alidade qui, en temps ordinaire, sert à la lecture des angles de la lunette. Ce système comprend les ressorts R, qui permettent d'écarter les bobines, par le jeu des écrous E, pour enlever la substance *p* avec son support, et de les ramener ensuite exactement à leur place. Dans la *fig.* 2, ce mouvement est indiqué par des flèches. Les bobines avaient chacune 200 tours de fil fin de $0^{mm},1$; elles entouraient la substance aussi exactement que possible et avaient à peu près la disposition des bobines d'une boussole de Helmholtz. Des butoirs tels que *e* limitaient les angles de rotation de la substance ou des bobines.

Le champ magnétique était obtenu au moyen d'un aimant permanent d'abord, d'électro-aimants ensuite. Ces appareils étaient suspendus à un pied à crémaillère, semblable à ceux des appareils photographiques de grande dimension ; ils pouvaient à volonté être rapprochés ou éloignés des bobines. Ce déplacement servait, avec l'aimant permanent, à faire varier l'intensité du champ; mais bientôt il a été évident que la partie la plus intéressante des phéno-

mènes se rencontrerait dans les champs très intenses. L'aimant permanent a été remplacé alors successivement par trois électro-aimants, dont le plus puissant a permis d'atteindre des champs de 10000 gauss.

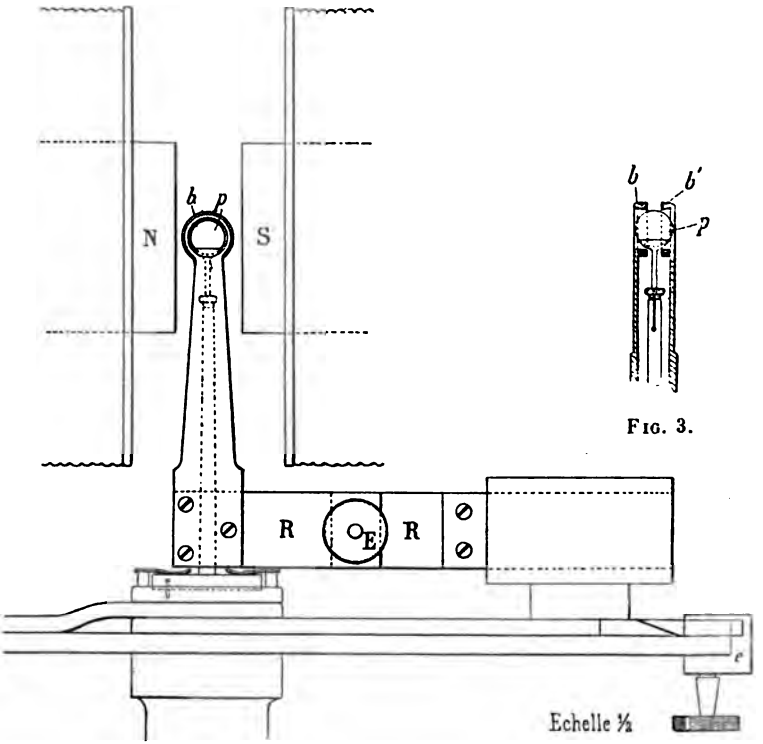


Fig. 3.

Fig. 1.

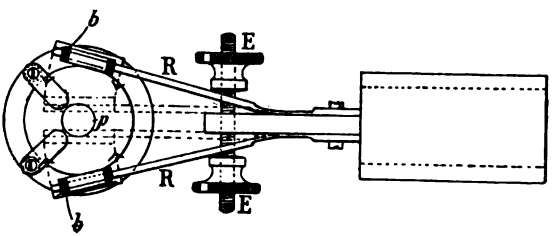


Fig. 2.

A plusieurs reprises, j'ai soupçonné le défaut d'uniformité du champ des électro-aimants d'être la cause de certaines irrégularités

dans les mesures; j'ai donc, à chaque reconstruction des appareils, pris des précautions plus grandes pour l'uniformité du champ. Les résultats n'en ont pas été modifiés; l'uniformité était donc suffisante.

Le problème expérimental, dans sa généralité, consiste à déterminer les trois composantes de l'intensité d'aimantation en fonction des trois composantes du champ. J'ai montré ailleurs [1] comment il se simplifie quand on tient compte de la conservation du travail dans les transformations isothermiques réversibles. Dans ces expériences, je ne me suis appuyé sur cette propriété du travail que pour obtenir des vérifications (Voir *loc. cit.*) et j'ai abordé le problème directement, en mesurant successivement la composante de l'aimantation parallèle au champ et la composante horizontale perpendiculaire au champ, évitant seulement de rendre nécessaire la mesure de la composante verticale.

Calcul des observations. — Soit un courant i dans un circuit fixe (*fig.* 4), produisant, en un point quelconque A de l'espace, un champ exprimé par le vecteur $G \times i$. G est la quantité dont l'emploi s'imposerait si l'on faisait du circuit électrique un galvanomètre. Je l'appellerai constante galvanométrique au point A.

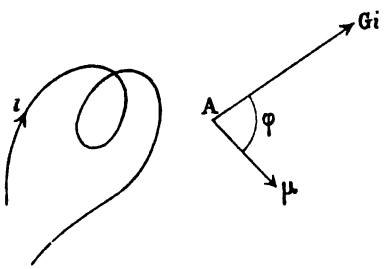


Fig. 4.

Supposons, pour la démonstration à faire, le courant i constant, c'est-à-dire la force électromotrice de la source d'électricité constamment égale à la somme de celle qu'exige la loi d'Ohm et de celle qui surmonte la force électromotrice d'induction E.

Produisons en A, par un procédé quelconque, un moment magnétique μ faisant avec Gi un angle φ. L'énergie relative $Gi\mu \cos \varphi$

(1) *C. R.*, 4 janvier 1904; — *J. de Phys.*, 4e série, III, 194; 1904.

de μ et de l'appareil producteur du champ est transmise par le mécanisme de l'induction à la source. Elle est $\int Eidt$. Donc

$$G\mu \cos\varphi = \int Edt.$$

Revenant maintenant au cas où le même circuit de résistance totale R, sans courant, contient un galvanomètre balistique, nous mesurerons, au moment de la production du moment μ, une quantité d'électricité :

$$q = \frac{1}{R}\int Edt = \frac{G}{R}\mu \cos\varphi,$$

et, si nous étendons l'aimantation à un solide dont l'élément de volume est dv, en posant $\mu = Idv$:

$$q = \frac{1}{R}\int I \,.\, G \cos\varphi dv.$$

Considérons deux cas particuliers :

1° Le circuit est quelconque, I est constant en grandeur et en direction dans toute l'étendue de la substance. Soient $I_x, I_y, I_z, G_x, G_y, G_z$, les composantes rectangulaires de I et de G, on aura :

$$q = \frac{1}{R}\left(I_x \int G_x dv + I_y \int G_y dv + I_z \int G_z dv\right).$$

Si la substance est une sphère centrée par rapport aux bobines induites comme dans la *fig.* 3, et si l'axe des bobines est l'axe des x, $\int G_y dv$ et $\int G_z dv$ seront nuls, et il restera :

$$q = \frac{I_x}{R}\int G_x dv.$$

Donc, dans ce cas, le galvanomètre balistique mesurera la composante de l'aimantation parallèle à l'axe des bobines.

2° Le champ que produirait un courant i dans les bobines induites est uniforme dans toute l'étendue de l'espace occupé par la substance, alors

$$q = \frac{G}{R}\int I \cos\varphi dv,$$

et le galvanomètre balistique mesure exactement la valeur moyenne de la composante de l'aimantation dans la direction de ce champ uniforme.

Les conditions de l'expérience réalisent approximativement l'un et l'autre de ces cas particuliers, le premier lorsque le champ de l'*aimant* est uniforme, le second lorsque, comme dans la boussole de Helmholtz, les *bobines* ont l'écartement qui donne le champ le plus uniforme.

Par la rotation de la substance, placée dans un champ magnétique et entre les bobines induites immobiles, on obtiendra donc les *variations* de l'une ou de l'autre des deux composantes de l'aimantation, suivant que l'axe des bobines sera parallèle ou perpendiculaire au champ.

Mais il faut déterminer en outre, pour une position particulière de la substance, l'aimantation origine à partir de laquelle ces variations sont comptées.

Des raisons de symétrie donnent souvent les azimuts de la substance pour lesquels l'aimantation perpendiculaire au champ est nulle. On peut aussi les déterminer en cherchant par tâtonnements les positions de la substance où des variations d'intensité du champ n'agissent pas sur le galvanomètre. On s'est servi, avant la mise en place de la substance, du même critérium pour déterminer la position des bobines pour laquelle leur axe est perpendiculaire au champ.

Pour trouver la grandeur de la composante de l'aimantation parallèle au champ, on fait tourner les bobines induites de 180°, à partir de l'une des positions où leur axe est parallèle au champ, d'abord la substance étant en place, puis la substance enlevée. On voit immédiatement que la différence des deux indications du galvanomètre balistique donne l'intensité d'aimantation parallèle au champ avec la même unité avec laquelle ont été mesurées les variations par la rotation de la substance.

Valeur absolue. — Pour ramener ces mesures à des valeurs absolues, j'ai employé deux procédés.

On sait qu'une sphère de fer doux dans un champ magnétique H, qui n'est pas suffisant pour l'aimanter au delà de la région de forte perméabilité, prend une intensité d'aimantation donnée très approximativement par $\frac{3H}{4\pi}$. Elle est donc connue quand H est connu. Opé-

rant avec cette sphère comme avec la substance, on étalonne l'appareil pour les mesures d'intensité d'aimantation. Cette méthode donne de très bons résultats. Je lui ai préféré, dans la suite, celle qui consiste à mettre à la place de la substance une petite bobine d'aire connue, parcourue par un courant connu, c'est-à-dire de moment magnétique connu, que l'on fait tourner de 180°.

Dans les premières expériences, le champ a été mesuré en faisant tourner de 180° les bobines induites dont l'aire avait été mesurée, le galvanomètre étant étalonné au préalable au moyen d'un solénoïde entouré de quelques tours du circuit induit. Plus tard, je me suis servi de la balance magnétique absolue de M. A. Cotton [1]. Toutes les fois que le champ est suffisamment uniforme dans une étendue de 2 centimètres, cet appareil est d'une commodité et d'une exactitude remarquables.

Les sphères de pyrrhotine avaient 9 millimètres de diamètre, les disques 9 millimètres de diamètre et des épaisseurs variant un peu d'un disque à l'autre, un peu inférieures à 1 millimètre.

B. — *Mesure du couple exercé par le champ sur le cristal.*

Après avoir fait par la méthode d'induction de nombreuses observations, je l'ai remplacée presque complètement par une méthode fondée sur la mesure du couple qui tend à faire tourner la substance autour d'un axe vertical quand un champ d'intensité déterminée occupe successivement tous les azimuts dans le plan horizontal. Ce couple est égal au champ multiplié par la composante de l'aimantation perpendiculaire au champ et horizontale. Le champ étant connu, cette composante l'est aussi par la mesure du couple.

Dans un certain nombre de questions, cette composante intervient seule, et la méthode se suffit à elle-même. Je montrerai dans le chapitre consacré au plan magnétique dans quelle mesure elle peut être adaptée à la mesure de la composante de l'aimantation parallèle au champ.

La *fig.* 5 représente l'un des appareils que j'ai employés. Un électroaimant E, dont les bobines portent 2000 tours de fil, donne, entre les noyaux écartés de $12^{mm},5$, pour un courant de 15 ampères, un champ très uniforme de 11000 unités. Il est porté par l'intermédiaire d'une

[1] A. Cotton, *J. de Phys.*, 3e série, IX, p. 383; 1900.

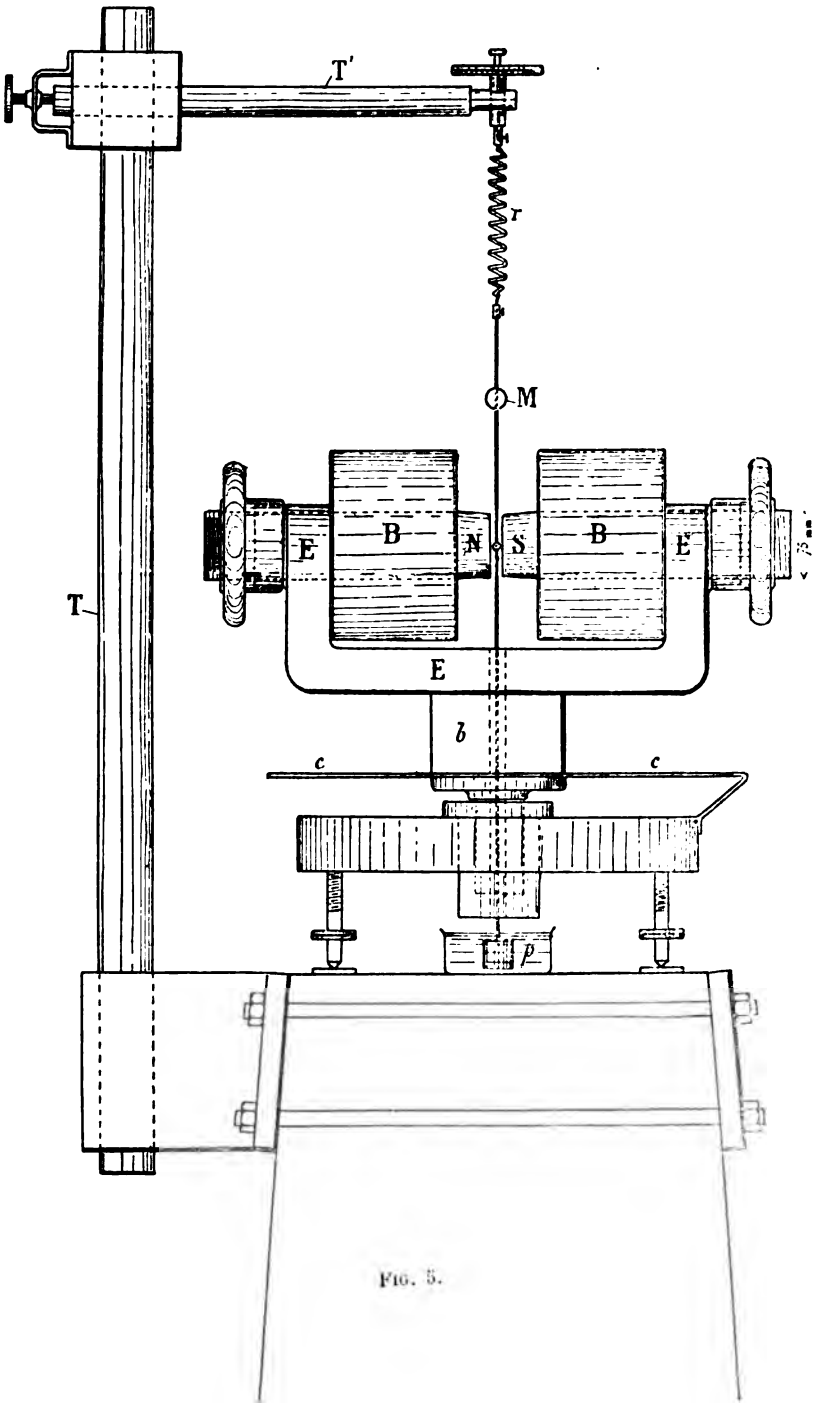


Fig. 5.

pièce de bois *b*, destinée à ménager la place nécessaire à la balance magnétique, par un pivot de bronze percé dans l'axe, et entraîne le cercle divisé *c*.

La substance placée entre les pôles est fixée sur une longue tige de cuivre suspendue au ressort de torsion *r*. Cette tige porte le miroir M, pour la lecture des déviations de l'équipage, et le poids de laiton *p*, plongé dans de la glycérine qui donne de la stabilité et sert d'amortisseur. Le bâti, formé de forts tubes de laiton T, T′, est pourvu des mouvements de réglage nécessaires, dont une partie seule est représentée.

Cette méthode est beaucoup plus sensible que celle du galvanomètre balistique et permet d'examiner des échantillons beaucoup plus petits. Quand on se sert d'échantillons de même grandeur, toutes les perturbations dues aux courants d'air, au magnétisme du support sont négligeables; elle devient extrêmement commode et sûre.

La petite correction des azimuts du champ par rapport à la substance lus sur le cercle, provenant de ce que la substance tourne par la torsion du ressort, a été faite.

CHAPITRE III.

ASSOCIATION DE TROIS CRISTAUX ÉLÉMENTAIRES DANS LE PLAN MAGNÉTIQUE.

J'ai montré antérieurement [1] que les cristaux de pyrrhotine ne s'aimantent que parallèlement au plan de base du prisme hexagonal que j'ai appelé plan magnétique; je consacrerai un chapitre du présent travail à cette question. Mais auparavant, pour déblayer le terrain, il est nécessaire de parler des propriétés magnétiques dans ce plan. Elles ont eu d'abord une allure très énigmatique. Très variables d'un échantillon à l'autre, elles possédaient tout au plus la symétrie clinorhombique à la place de la symétrie hexagonale attendue. Cette confusion s'est dissipée tout à coup à l'examen des courbes (*fig.* 6) qui représentent un résultat immédiat d'expérience. Dans cette figure, les abscisses sont les azimuts d'un champ magnétique constant, et les ordonnées de la courbe supé-

[1] *C. R.*, t. CXXVI, p. 1099; 1898; — et *Bull. des Séances de la Soc. de Phys.*, p. 87; 1899.

rieure les composantes de l'aimantation parallèle au champ, celles de la courbe inférieure les composantes perpendiculaires au champ. Les phénomènes se reproduisent à 180° de distance.

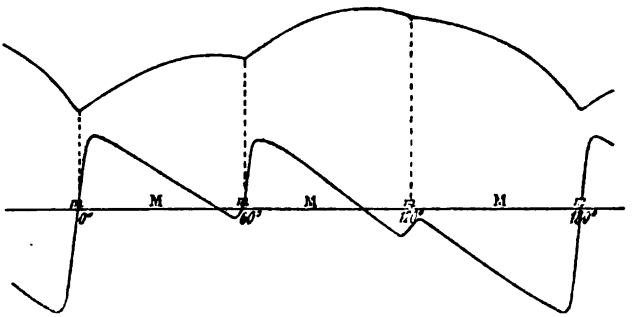


Fig. 6.

Pour interpréter cette courbe, j'ai recours à une image. Supposons que nous fassions tourner le champ magnétique dans le plan d'une plaque elliptique de fer doux. Aux axes, l'aimantation coïncidera avec le champ. Le grand axe sera un maximum, le petit axe un minimum d'aimantation. Pour toute autre direction du champ, l'aimantation sera plus voisine du grand axe que le champ. Dans la rotation continue du champ, l'aimantation tournera donc plus len-

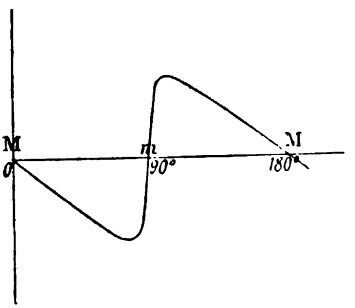


Fig. 7.

tement que celui-ci dans le voisinage du grand axe et plus vite dans le voisinage du petit axe. Si l'ellipse est très allongée, dans le voisinage du minimum, la composante de l'aimantation perpendiculaire au champ passera presque instantanément d'une très grande

valeur négative à une très grande valeur positive, comme le représente la *fig.* 7. La courbe inférieure de la *fig.* 6 résulte visiblement de l'addition des ordonnées de trois courbes analogues à celles de la *fig.* 7, construites à des échelles différentes et déplacées les unes par rapport aux autres de 60° et de 120°.

Nous supposerons donc que *l'édifice complexe du cristal résulte de la juxtaposition de cristaux élémentaires dont les plans magnétiques sont parallèles et qui possèdent chacun un maximum et un minimum d'aimantation rectangulaire.* Ces cristaux sont associés dans le plan magnétique sous des angles de 60°, ou, ce qui revient au même, de 120°.

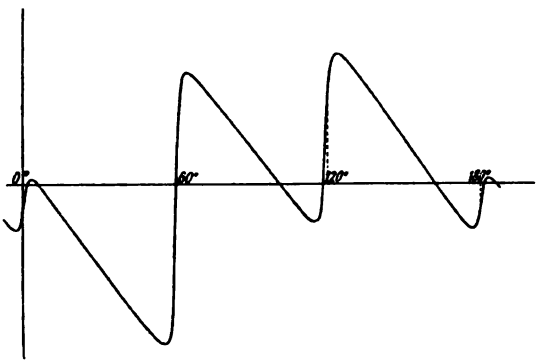


Fig. 8.

L'amplitude des variations brusques de la composante perpendiculaire au champ donne l'importance relative des trois composantes. Cette analyse du groupement cristallin se fait avec une netteté inégale suivant la grandeur du champ employé. La *fig.* 8, représentant l'aimantation perpendiculaire au champ pour une substance de Morro Velho dans un champ de 4000 gauss, donne un exemple de phénomène particulièrement brusque. La répartition de la matière entre les trois composantes est donnée dans cet exemple par :

$$100 : 66,1 : 16,9.$$

Les angles rentrants de la courbe supérieure de la *fig.* 6 correspondent aux minima très accentués de l'aimantation parallèle au champ de chacune des composantes.

Cherchant à isoler la pyrrhotine élémentaire, j'ai déterminé la

composition de plusieurs centaines d'échantillons. Pour certains d'entre eux, les trois composantes étaient sensiblement égales ; pour d'autres, deux d'entre elles prédominaient ; pour d'autres encore, une seule était prépondérante. Mais, même en divisant la matière en tout petits fragments, je n'ai pu rencontrer un échantillon absolument simple. La subdivision parallèle ou perpendiculaire au plan magnétique semblait indifféremment peu avantageuse dans cette recherche. On peut en conclure que l'enchevêtrement est très intime et que la composition, peu variable, a été déterminée, sans doute, par les conditions à peu près uniformes dans toute son étendue dans lesquelles le cristal s'est formé. Avec de la patience, on trouve des fragments relativement simples. Ainsi j'ai mesuré sur un petit clivage de New-Jersey, dont j'ai fait une étude magnétique complète :

Substance 1 (New-Jersey), les rapports

$$100 : 4,75 : 3,1.$$

Sur un autre échantillon, de $0^{mgr},4$, trop petit pour des mesures précises, j'ai évalué :

$$100 : 3 : 0.$$

L'existence de la matière simple est donc certaine.

J'indiquerai encore ici la composition de deux échantillons sur lesquels j'ai fait de nombreuses mesures :

Substance 2 (New-Jersey) :

$$100 : 11 : 4,7.$$

Une deuxième détermination, fondée sur des expériences nombreuses faites avec des appareils différents plus précis, a donné :

$$100 : 10,85 : 4,95.$$

Substance 3 (Morro Velho), premières expériences imparfaites, méthode balistique :

$$100 : 17,5 : 5,5.$$

Même substance, huit ans plus tard, méthode de mesure des couples, expériences précises :

$$100 : 19,6 : 5,4.$$

C'est cette dernière substance (disque de 9 millimètres de diamètre et de $0^{mm},75$ d'épaisseur) qui a été l'objet de l'étude la plus complète.

On voit par ces exemples que la détermination de la composition d'un cristal de pyrrhotine se fait avec une certaine sûreté, que j'évalue, dans les meilleurs cas, à 0,2 0/0.

Ne pouvant isoler l'élément simple, je me suis résigné à déduire ses propriétés de celles des cristaux complexes. J'ai déterminé à cet effet par tâtonnements les deux coefficients par lesquels il faut multiplier les résultats d'observation pour les retrancher ensuite, avec une avance de 60° ou de 120°, afin que les ordonnées restantes représentent les propriétés d'un cristal simple. La *fig.* 9, qui se rap-

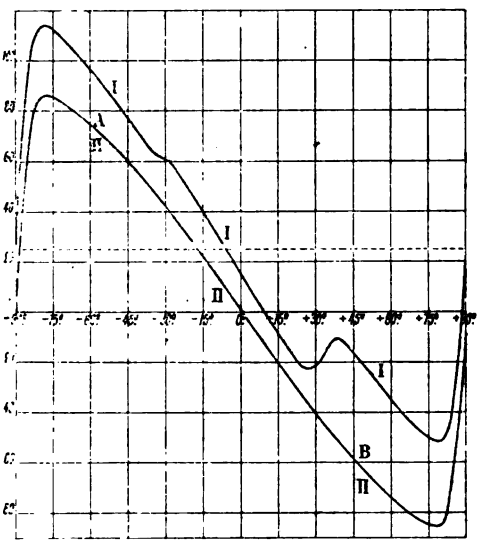


Fig. 9.

porte à la substance 3, dans un champ de 1992 gauss, donne un exemple de cette épuration graphique. La courbe I est expérimentale, la courbe II est corrigée des deux substances parasites. Le critérium de la réussite de l'opération est la régularité de la courbe entre A et B, qui s'estime très sûrement, grâce à sa forme presque rectiligne.

La composante de l'aimantation parallèle au champ est traitée de la même manière que la composante de l'aimantation perpendicu-

laire au champ, et ces opérations sont répétées pour plusieurs valeurs du champ. Le résultat de ces opérations sera décrit au chapitre suivant; il est compatible avec la symétrie orthorhombique.

Les propriétés ferromagnétiques, dont la connaissance est ici le but du travail, peuvent donc, dans certains cas, être un moyen d'investigation des groupements cristallins. La portée de ce procédé est limitée par le petit nombre des substances ferromagnétiques. Mais, comme elles sont opaques, il peut rendre des services précisément là où la méthode optique est impuissante.

CHAPITRE IV.

PROPRIÉTÉS DU CRISTAL ÉLÉMENTAIRE.

Soient, dans un cristal élémentaire de pyrrhotine, H_x, H_y, les deux composantes du champ; I_x, I_y, celles de l'intensité d'aimantation dans le plan magnétique, l'axe Ox (*fig.* 10) étant la direction de facile aimantation, l'axe Oy celle de difficile aimantation. Lorsque l'extrémité du vecteur H décrit le plan, l'expérience montre que l'extrémité du vecteur I reste à l'intérieur d'une circonférence E, que j'appellerai le cercle de saturation, dont le rayon I_M est l'intensité de l'aimantation à saturation.

Si nous faisons abstraction des phénomènes d'hystérèse, il est indifférent que H arrive en un point par un chemin ou par un autre. On obtiendra donc tous les renseignements désirables en opérant avec des champs constants, de différentes grandeurs, tournant dans le plan magnétique.

La *fig.* 10 montre la physionomie des courbes A, B, C, D que décrit le vecteur I quand le champ a les valeurs de 1992, 4000, 7310, 11140 gauss. Pour tous ces champs, l'aimantation atteint la valeur I_M dans la direction Ox, et, quand le champ s'écarte de Ox, suit d'abord le cercle de saturation, sur un arc d'autant plus étendu que le champ est plus intense. Puis elle quitte assez brusquement ce cercle, pour décrire une courbe assez voisine d'une corde parallèle à Ox.

La rotation de l'aimantation est, dans un angle assez étendu à partir de Ox, proportionnelle à la rotation du champ, mais d'autant

plus ralentie par rapport à celle-ci que le champ est plus faible. Dans le voisinage de Oy, la rotation de l'aimantation est, au contraire, beaucoup plus rapide que celle du champ, et le rapport des tangentes des angles de l'aimantation et du champ avec Oy est sensiblement constant.

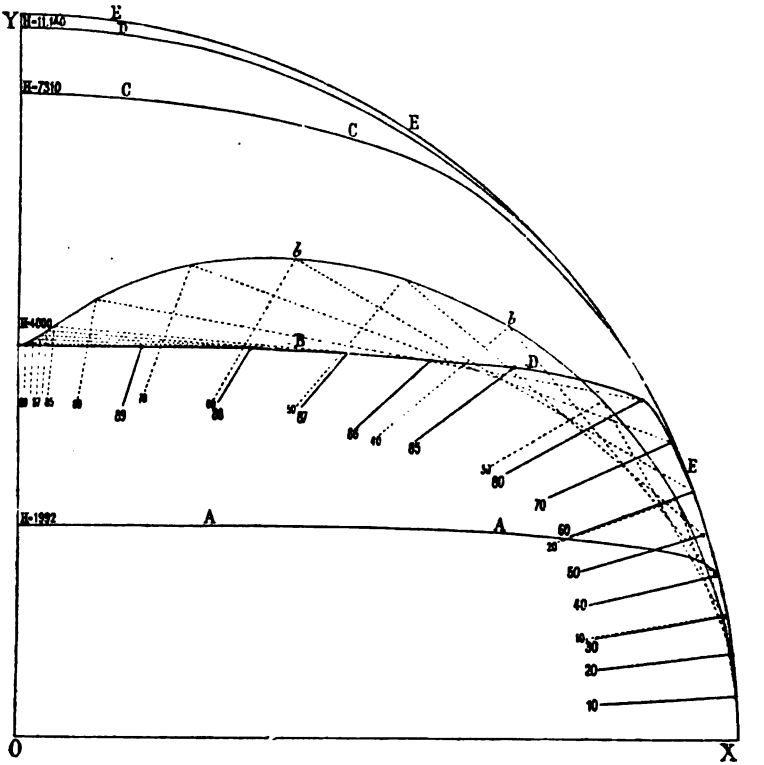


Fig. 10.

Ces caractères ont été rendus sensibles dans la courbe B, correspondant à H = 4000 gauss, dans laquelle les rayons en traits pleins représentent les directions de l'aimantation, les rayons pointillés les directions du champ, les nombres indiquant, pour les uns et les autres, les angles correspondants du *champ* avec Ox.

Pour construire cette courbe, j'ai porté d'abord dans la direction des champs, pour tous les angles de 10° en 10° dans le voisinage du maximum, de degré en degré dans le voisinage du minimum,

la composante de l'aimantation parallèle au champ. J'ai obtenu ainsi la courbe *b* de la composante de l'aimantation parallèle au champ ; j'en ai ensuite déduit la courbe B en portant l'aimantation perpendiculaire au champ perpendiculairement sur les rayons vecteurs de la courbe *b*. Les données d'expérience relatives à cette construction, pour cinq valeurs différentes du champ, sont contenues dans les *fig.* 11 et 12.

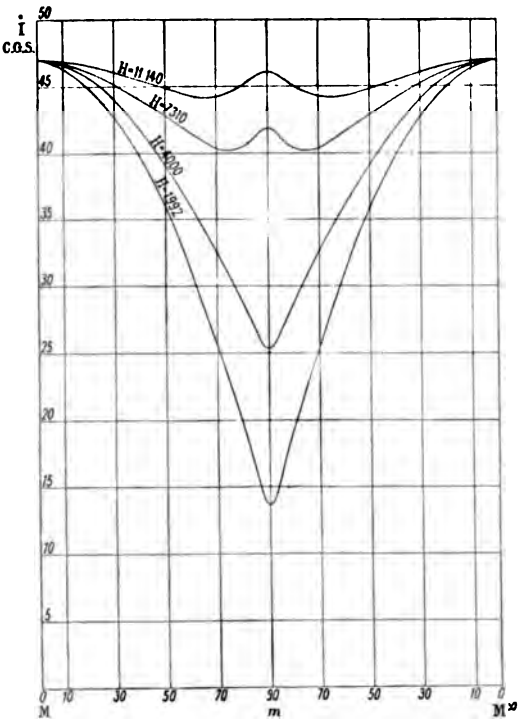


FIG. 11. — Composante de l'aimantation parallèle au champ.

Cette physionomie générale appartient à toutes les pyrrhotines, que nous distinguerons plus tard en normales et anormales, et à toutes les valeurs du champ, depuis les plus faibles jusqu'à celles qui suffisent pour faire décrire à I le cercle de saturation tout entier. Ce qui suit, par contre, est particulier aux pyrrhotines normales de Morro Velho en cristaux compacts.

Soient α et φ les angles de H et de I avec Ox (*fig.* 13); décomposons H en deux composantes H_D dirigée suivant Oy et H_1 parallèle à l'inten-

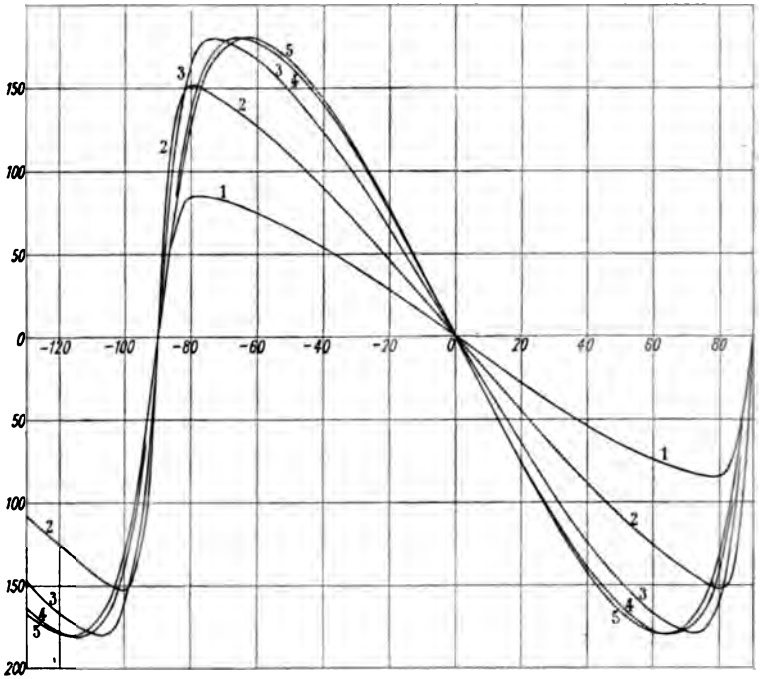


FIG. 12.

Courbe 1.....	H =	1992 gauss
— 2.....	H =	4000
— 3.....	H =	7310
— 4.....	H =	10275
— 5.....	H =	11140

Abscisses : Angles d'orientation du champ par rapport à la substance, mesurés dans le plan magnétique.

Ordonnées : Couples en millimètres de l'échelle divisée. Pour obtenir ces couples en ergs par centimètre cube de la substance, multiplier par 950.

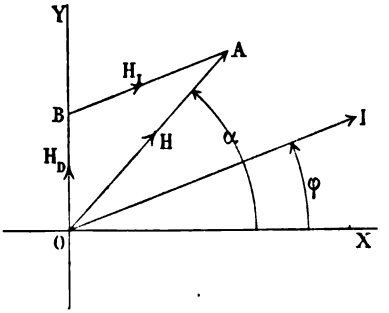


FIG. 13.

sité d'aimantation. Il y a un rapport constant

$$\frac{H_D}{I \sin \varphi} = N$$

entre la composante H_D du champ et la composante de l'aimantation suivant Oy, quels que soient H et α.

Cette proposition est établie par la *fig.* 14, dans laquelle j'ai porté en abscisses les champs H_D résultant de cette décomposition et en ordonnées les composantes I sin φ, pour les cinq séries d'expériences faites avec les champs de 1992, 4000, 7310, 10275, 11140 gauss, en déplaçant pour chaque série l'origine sur l'axe des abscisses d'une quantité égale à 500 gauss, pour éviter la superposition des courbes. Les nombres portés sur les courbes sont les valeurs de α en degrés. Les droites pointillées correspondent à

$$\frac{H_D}{I \sin \varphi} = \frac{7300}{47};$$

elles coïncident au degré de précision des expériences avec les courbes. *Tout se passe donc comme si la substance annulait, par un phénomène démagnétisant dû à sa structure, une composante du champ proportionnelle à la composante de l'aimantation dans la direction de difficile aimantation, et qu'ensuite la composante restante était parallèle à l'aimantation.*

Dans l'échantillon examiné, I_M est égal à 47 unités. Le champ démagnétisant maximum est de 7300 gauss. I_M est assez variable d'un échantillon à l'autre. Le champ démagnétisant maximum n'a été mesuré avec précision que sur un seul échantillon; je ne saurais donc dire s'il est une constante caractéristique de la pyrrhotine; mais il semble, d'après les propriétés de quelques autres échantillons examinés plus sommairement, qu'il ne doive pas varier beaucoup.

Pour déduire de ce résultat expérimental les conséquences qu'il comporte, il est commode de faire intervenir la notion de travail d'aimantation. Ce travail est donné par la différentielle exacte :

$$dT = H \cos(\alpha - \varphi)\, dI + HI \sin(\alpha - \varphi)\, d\varphi,$$

où H et α sont considérés comme fonctions des variables indépendantes I et φ. Il en résulte :

$$\frac{\partial H \cos(\alpha - \varphi)}{\partial \varphi} = \frac{\partial HI \sin(\alpha - \varphi)}{\partial I}.$$

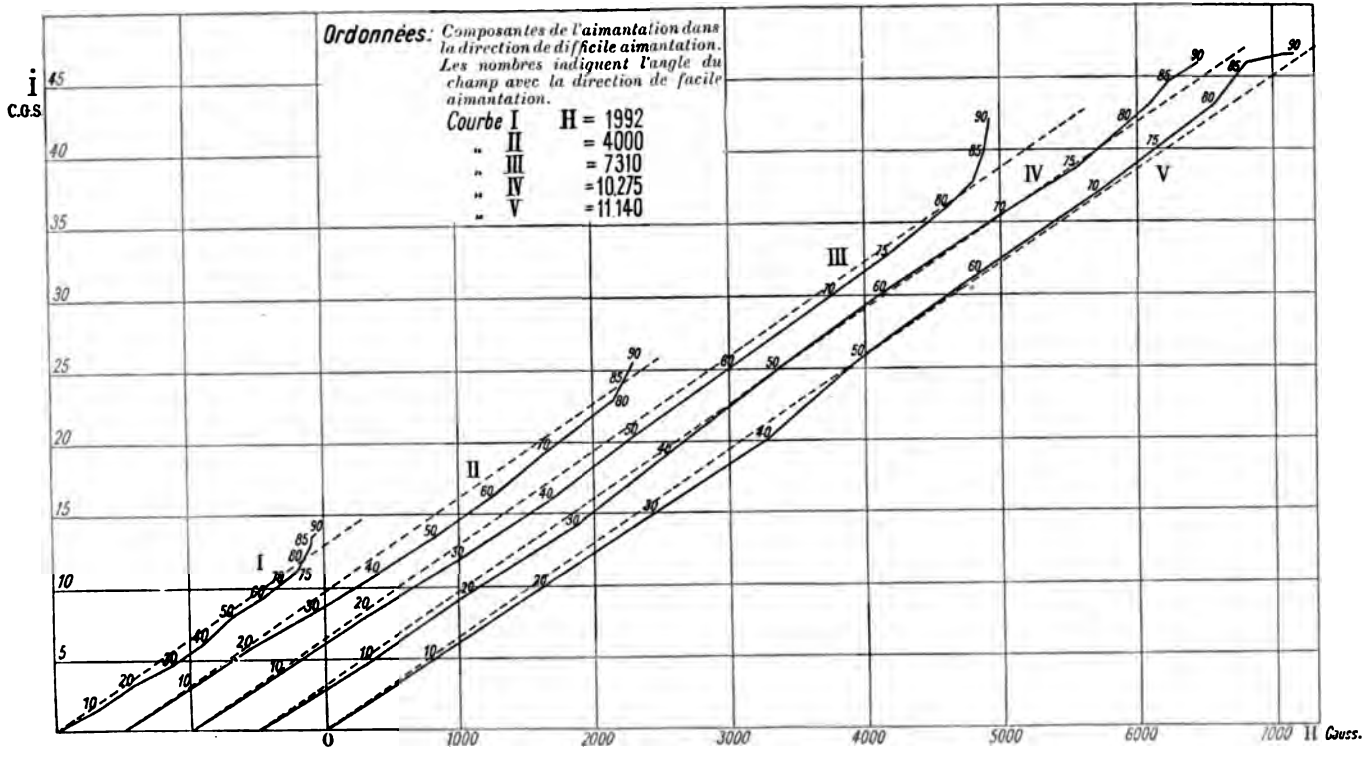

Ordonnées: Composantes de l'aimantation dans la direction de difficile aimantation. Les nombres indiquent l'angle du champ avec la direction de facile aimantation.
Courbe I H = 1992
" II = 4000
" III = 7310
" IV = 10.275
" V = 11.140
I
C.G.S
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
H Gauss.
I
II
III
IV
V

FIG. 14.

Si, pour une substance, l'aimantation a constamment la direction du champ, $\alpha - \varphi = 0$, et par suite $\frac{\partial H}{\partial \varphi} = 0$. La relation entre le champ et l'intensité d'aimantation est donc la même dans tous les azimuts.

Cela posé, remarquons que le travail de la composante du champ $H_D = NI \sin \varphi$, considérée seule, est $NI \sin \varphi \, dI \sin \varphi$, c'est-à-dire différentielle exacte. Il s'ensuit que le travail de l'autre composante H l'est aussi. Donc la proposition que nous venons d'établir s'applique à cette composante. Nous en concluons que *la loi de l'aimantation, déduction faite du champ démagnétisant* H_D, *est la même dans tous les azimuts.*

Reste à déterminer cette loi pour un azimut particulier. Je choisis à cet effet la direction de facile aimantation. La courbe OAC de la *fig.* 15, page 359, représente l'intensité d'aimantation en fonction du champ pour cette direction.

Elle part de l'origine avec une inclinaison constante, correspondant à une susceptibilité initiale $k_0 = \frac{47}{110}$, qui la conduirait, si elle se continuait, à la saturation pour un champ de 110 gauss. Au lieu de cela, la courbe devient concave du côté de l'axe des abscisses, à partir d'une intensité égale à $\frac{I_M}{2}$ environ, et s'arrondit vers la ligne de saturation $I_M =$ constante, à laquelle elle est tangente à l'abscisse de 700 gauss. A partir de ce moment, elle se confond exactement avec elle jusqu'aux champs les plus élevés dans tout l'intervalle accessible, jusqu'à 11140 gauss. Un exemple aussi caractéristique de saturation constante ne se rencontre pas, à ma connaissance, parmi toutes les données expérimentales que l'on possède sur les corps ferromagnétiques.

Pour l'interprétation des résultats expérimentaux dans les champs faibles, il convient de tenir compte des phénomènes démagnétisants dont l'objet en expérience est le siège, par suite de ses dimensions finies. Celui-ci, un disque de 9 millimètres de diamètre et de $0^{mm},75$ d'épaisseur, donnerait, assimilé à l'ellipsoïde aplati inscrit, par suite du phénomène démagnétisant, une susceptibilité initiale apparente égale à 1,5 seulement, alors même que la substance dont il serait fait aurait une susceptibilité infinie. Elle est un peu plus forte que celle du disque de pyrrhotine. Mais l'écart entre les deux se réduit singulièrement si l'on considère que les cristaux ne sont jamais tout à fait

exempts d'impuretés, que leur matière n'est souvent pas tout à fait continue, comme en témoignent les variations de la densité et de petites cavités limitées souvent par les faces naturelles du cristal, et que l'échantillon actuel en particulier était sillonné de petites cassures assez nombreuses. Remarquons en outre que, si la substance avait la forme d'un ellipsoïde *et qu'elle était aimantée dans la direction de l'un de ses axes*, la loi démagnétisante serait rectiligne jusqu'à la saturation. Par contre, si, pour l'ellipsoïde, la direction du champ est quelconque et si l'on considère *la composante de l'aimantation dans la direction du champ*, la loi d'aimantation apparente d'une substance de susceptibilité infinie n'est pas linéaire; elle tend asymptotiquement vers la saturation [1]; sa susceptibilité apparente sera décroissante vers la saturation. Les défauts de la matière donnent lieu précisément à des champs démagnétisants *obliques* sur l'intensité d'aimantation.

Rien ne s'oppose donc à ce que l'on fasse l'hypothèse que, la substance étant supposée parfaitement continue et indéfinie, l'aimantation atteint, dans la direction de facile aimantation, la saturation dès les champs les plus faibles et la conserve absolument constante jusqu'aux champs les plus élevés.

Cette hypothèse est certainement la plus simple que l'on puisse imaginer; elle doit donc être adoptée jusqu'à ce qu'elle ait été mise en contradiction avec l'expérience. Elle peut sans doute être étendue dans certains cas aux métaux et expliquerait alors aisément, pour les fils de fer dont la structure fibreuse est certainement très continue dans le sens longitudinal, les perméabilités atteignant 60000 trouvées par Ewing, quand des trépidations suppriment les phénomènes d'hystérèse.

Cette hypothèse permet de donner une définition de la courbe d'aimantation réversible ou courbe d'équilibre. Ce serait la courbe d'aimantation d'une matière fictive, de même structure que la matière réelle, mais de susceptibilité infinie et dépourvue d'hystérèse. Elle fournit ainsi un point d'appui à la discussion de la question sur laquelle M. Ch. Maurain a fait récemment d'intéressantes expériences [2].

L'expérience donne autant de vérifications qu'il y a de directions pour lesquelles la loi d'aimantation a été déterminée. Considérons

---

(1) Voir, dans le même ordre d'idées, les considérations de la page 359.
(2) *J. de Phys.*, 4e série, t. III, p. 360.

la courbe OB'C' (*fig.* 15), correspondant à la direction de difficile aimantation. Si la matière était parfaitement continue et illimitée, elle devrait coïncider avec la ligne brisée OBC, tracée en donnant au point B une abscisse égale au champ démagnétisant maximum de 7300 gauss.

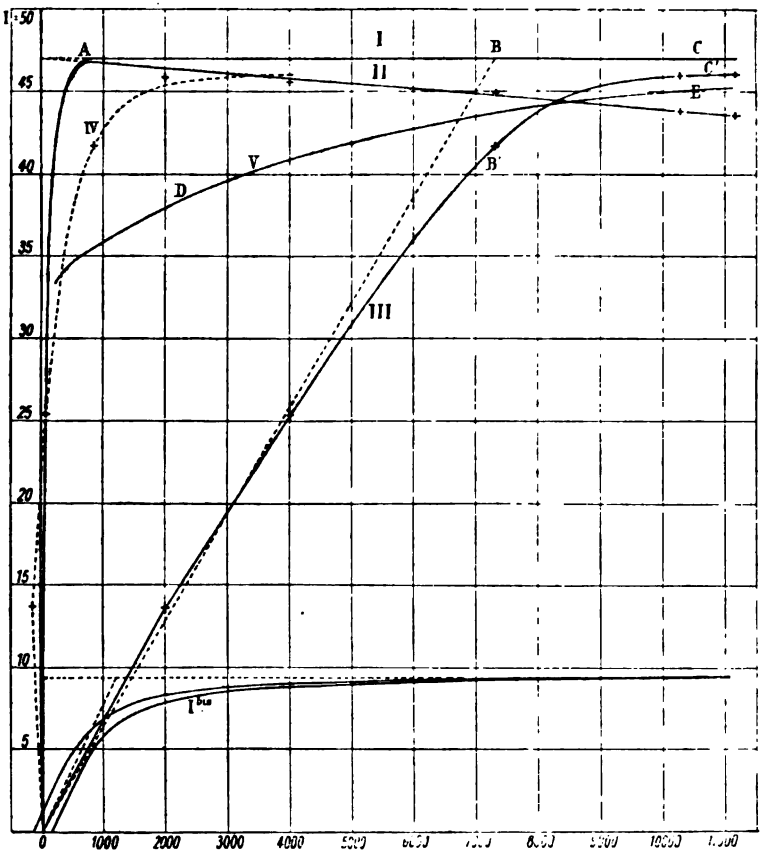


FIG. 15.

Courbes d'aimantation. — I, dans la direction de facile aimantation. — II, comme courbe I, mais sans la correction de susceptibilité normale. — III, dans la direction de difficile aimantation. — IV et V, voir le texte. — I *bis*, comme I, échelle du champ dix fois plus grande, de l'aimantation cinq fois plus petite.

Si la condition d'isotropie après déduction du champ démagnétisant était satisfaite, il devrait y avoir la même différence d'abscisses entre OB'C' et la ligne brisée OBC qu'entre OA et l'axe des ordon-

nées. Ces premières différences sont un peu plus grandes en général, pas assez cependant pour altérer le caractère de la courbe OB'C'. La divergence ne dépasse pas l'incertitude expérimentale, qui est assez grande au minimum, à cause des variations rapides des deux composantes de l'aimantation en fonction de α. Pour faciliter la comparaison, la courbe OB'C', déduction faite des champs démagnétisants, a été tracée en IV.

La pyrrhotine nous fournit donc, au maximum et au minimum, deux types de « courbes d'aimantation » essentiellement différents, mais qui ont un caractère commun : la saturation est atteinte pour une valeur finie du champ. L'aimantation à saturation au minimum a été trouvée inférieure de 2 p. cent à cette quantité au maximum. Cette faible différence est due sans doute à des erreurs d'expériences. Je n'ai pas réussi à en préciser la nature, bien que cet écart soit supérieur à l'incertitude moyenne des mesures.

Pour une direction oblique sur les axes, plusieurs définitions de la courbe d'aimantation sont possibles ; je considérerai ici, pour un champ de direction constante, la composante de l'aimantation dans cette direction en fonction de l'intensité de ce champ. L'aimantation ne coïncidant en direction avec le champ que quand il est infini, cette courbe d'aimantation aura la droite de saturation comme asymptote.

Cherchons l'équation de cette courbe. On déduit du triangle OAB (*fig.* 13) comme expression de la loi démagnétisante :

$$H \sin(\alpha - \varphi) = NI \sin\varphi \cos\varphi,$$

qui, appliquée au cercle de saturation, devient :

$$H \sin(\alpha - \varphi) = NI_M \sin\varphi \cos\varphi.$$

Et posons :

$$\mathfrak{I} = I_M \cos(\alpha - \varphi),$$

on obtient par élimination de φ entre ces deux dernières équations :

$$H = \frac{N}{2} \sin 2\alpha \frac{\mathfrak{I}^2}{\sqrt{I_M^2 - \mathfrak{I}^2}} - N\mathfrak{I} \cos 2\alpha - \frac{N}{2} \sin 2\alpha \sqrt{I_M^2 - \mathfrak{I}^2}.$$

Le premier seul des trois termes du second membre devient infini quand $\mathfrak{I}$ tend vers I_M. Quand $\frac{1}{H}$ est infiniment petit du premier

ordre, $I_M - \delta$ est infiniment petit du second ordre. Cette propriété est accessible à l'expérience, mais d'une vérification délicate.

La courbe V de la *fig.* 15 représente la courbe d'aimantation au sens ci-dessus indiqué, pour $\varphi = 45°$.

On conçoit aisément que toutes les courbes d'aimantation usuelles puissent s'expliquer par la superposition de propriétés analogues à celles de la pyrrhotine dans la direction du maximum, du minimum et dans les directions obliques.

La nécessité de multiplier les contrôles conduit à envisager les hypothèses démagnétisantes que nous avons faites sous d'autres aspects.

a) Définissons, par analogie avec $N = \frac{H_D}{I \sin \varphi}$, un coefficient :

$$n = \frac{H_I}{I};$$

n est l'inverse de la susceptibilité relative à l'aimantation rendue isotrope par la défalcation du champ H_D. Tant que I est petit, la susceptibilité initiale $\frac{1}{n}$ est constante; n est déjà connu par la courbe d'aimantation relevée dans la direction de facile aimantation et est égal à :

$$\frac{110}{47} = 2{,}34.$$

En déduisant n de données provenant du voisinage du minimum d'aimantation, on vérifie l'isotropie de la substance après déduction du champ démagnétisant NI.

Or on démontre facilement qu'au minimum, tant que la saturation n'est pas atteinte, le rapport de la vitesse de rotation de l'aimantation à celle du champ est :

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\alpha} = \frac{N}{n} + 1. \qquad (2)$$

Cette quantité est assez facile à relever avec une certaine exactitude sur les courbes telles que celles de la *fig.* 10; on trouve :

H	$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\alpha}$	n
97,2	82	1,92
194	77	2,05
564	73	2,13
2250	33	4,72
3830	17	9,15

On voit qu'en effet les valeurs de n déduites des observations au minimum sont assez constantes dans les champs faibles et voisines de la valeur trouvée au maximum. Dans les champs plus forts, n augmente comme cela est prévu.

b) Comme nous l'avons déjà indiqué, la relation

$$(1) \qquad H \sin(\alpha - \varphi) = NI \sin\varphi \cos\varphi,$$

déduite du triangle OAB (*fig.* 13), est l'expression analytique de la loi démagnétisante. Cette expression, multipliée par I, donne le couple exercé par le champ sur la substance :

$$(3) \qquad C = HI \sin(\alpha - \varphi) = NI^2 \sin\varphi \cos\varphi;$$

ce couple est maximum quand $I = I_M$ et $\varphi = 45°$. On doit donc, dans la mesure de C en fonction de α, trouver un couple maximum invariable dès que le champ est assez fort pour faire décrire à l'aimantation, à partir de la direction Ox, un arc égal ou supérieur à 45° sur le cercle de saturation. C'est effectivement ce qui frappe à première vue dans la *fig.* 12, dans laquelle le maximum des trois courbes correspondant aux champs les plus intenses est le même. Ces couples sont, exprimés en millimètres de l'échelle des déviations :

Pour H = 4000	149 millimètres
= 7310	179,4
= 10250	181,0
= 11140	180,8

Pour ramener ces couples à leurs valeurs absolues pour l'unité de volume, il faut les multiplier par $\frac{47}{0,0494}$.

La valeur du couple maximum étant $\frac{NI_M^2}{2}$ d'après (3), on déduit de la moyenne des trois déterminations le champ démagnétisant maximum :

$$NI_M = 7300.$$

C'est cette valeur que j'ai admise comme étant la plus sûre, elle concorde bien avec l'ensemble des déterminations de la *fig.* 14, qui aurait permis d'hésiter entre 7200 et 7500.

c) L'expression du couple $C = NI^2 \sin\varphi \cos\varphi$, combinée à celle du

rapport des vitesses de rotation de l'aimantation et du champ au minimum :

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\alpha} = \frac{N+n}{n},$$

donne, pour le minimum,

$$\frac{\Delta C}{\Delta\alpha} = NI^2 \frac{N+n}{n},$$

et comme au minimum $(N+n)\,I = H$,

$$(4) \qquad \frac{\Delta C}{\Delta\alpha} = H^2 \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{1+\frac{n}{N}}.$$

formule qui n'est plus valable quand la saturation est atteinte, parce qu'alors N et n sont indéterminés, ou :

$$(4') \qquad \frac{\Delta C}{\Delta\alpha} = \frac{H^2}{n}$$

avec une grande approximation.

$\frac{\Delta C}{\Delta\alpha}$ est le coefficient angulaire au minimum de la courbe représentant les couples en fonction des azimuts, c'est-à-dire une donnée expérimentale immédiate. Si n était constant, ce coefficient angulaire croîtrait proportionnellement au carré du champ. C'est là l'origine de la variation brusque qui a servi à analyser le groupement cristallin dans le plan magnétique. On pourra donc constater à l'aide de ce coefficient angulaire la constance de n.

Les expériences au maximum montrent qu'après une valeur initiale constante n doit croître dans les champs plus élevés. On ne doit donc s'attendre à vérifier la constance de $\frac{1}{H^2}\frac{\Delta C}{\Delta\alpha}$ que pour les champs faibles. En outre, c'est le propre des erreurs expérimentales d'atténuer la brusquerie des phénomènes. Tous les petits accidents, tels que les déplacements angulaires provenant des petites cassures de la matière, la non-uniformité des champs démagnétisants, en retardant le phénomène pour certaines parties de la substance par rapport à d'autres, diminuent le maximum de $\frac{\Delta C}{\Delta\alpha}$, et pour la courbe

de l'aimantation parallèle au champ atténuent les angles rentrants. Aussi ai-je choisi parmi les échantillons dont je disposais, malgré sa moindre simplicité cristallographique, un disque donnant des phénomènes particulièrement brusques. J'ai trouvé au minimum de sa composante la plus importante :

H	$\frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$ millimètres par degré	$\frac{1}{H^2} \frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$
562	6,0	$0,186 \times 10^{-4}$
1171	21,7	0,159
2005	42	0,12
3945	100	0,064
7327	52	0,0096

Le couple exercé au minimum variait donc bien d'une manière voisine de la proportionnalité au carré du champ, dans les champs faibles.

Pour comparer la rapidité du phénomène dans cette nouvelle substance à celle de l'ancienne, j'exprime pour l'une et l'autre l'accroissement du couple pour 1° en pour cent de l'amplitude totale de la variation des couples :

H	Ancienne substance	Nouvelle substance
562	5,4 0/0	16,7 0/0
1171	—	29,5
2005	9,3	34
3945	11,6	45
7327	6,9	23,7

Dans la nouvelle substance, le phénomène est environ quatre fois plus rapide que dans l'ancienne.

L'épaisseur un peu moindre du disque ne suffit pas à expliquer cette augmentation, qui aurait dû, tout au plus, réduire de moitié le champ démagnétisant dû à la forme. Le caractère accidentel du coefficient n, variable d'un échantillon à l'autre, me paraît être un argument en faveur de l'hypothèse qui attribue la susceptibilité initiale de l'échantillon à sa structure grossière.

Puisque, dans l'ancienne substance, au minimum dans les champs faibles, l'aimantation tourne environ 80 fois plus vite que le champ (Voir p. 361), elle doit, dans la nouvelle, tourner environ 320 fois plus vite, si, ce qui est probable, N a à peu près la même valeur.

Une contre-épreuve consisterait à conserver la structure de l'échantillon, en faisant varier ses propriétés magnétiques. C'est précisément

ce qui arrive au cours de l'étude thermique du magnétisme. Dans un travail fait en collaboration avec M. J. Kunz, qui paraîtra prochainement, nous publierons une série de courbes relevées à diverses températures représentant C en fonction de α pour une même valeur du champ. Les coefficients angulaires au minimum $\frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$ sont les mêmes pour toutes ces courbes. C'est bien ce qui doit arriver si la grandeur de n est dépendante de la structure et non des propriétés magnétiques de la matière.

d) Au maximum, on déduit assez exactement des expériences le rapport des vitesses de rotation de l'aimantation et du champ. Il a pour expression

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta \alpha} = \frac{H}{H + NI_M} \tag{5}$$

et permet par conséquent de déterminer le champ démagnétisant maximum.

e) On relève aussi directement sur la courbe expérimentale donnant C en fonction de α la valeur de $\frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$ au maximum. Elle a pour expression :

$$\frac{\Delta C}{\Delta \alpha} = - NI_M^2 \frac{H}{H + NI_M}. \tag{6}$$

Je me suis servi à plusieurs reprises des formules (5) et (6), qui sont commodes, pour des contrôles qui sont en partie équivalents à ceux que j'ai déjà indiqués et sur lesquels je n'insiste pas.

CHAPITRE V.

LE PLAN MAGNÉTIQUE.

Dès le début des mesures sur la pyrrhotine, j'ai été frappé par la très grande différence d'intensité des propriétés magnétiques dans le plan de base du prisme hexagonal et perpendiculairement à ce plan. En tenant à la main un cristal que l'on approche d'un aimant, on se rend compte de l'attraction très vive qu'il éprouve et qui disparaît quand on le tourne de façon à présenter le plan de base et perpendiculairement aux lignes de force.

Mesurant la grandeur de l'aimantation dans le plan magnétique d'une part[1], et la différence entre l'aimantation parallèle et perpendiculaire à ce plan de l'autre, j'ai trouvé ces quantités égales.

Ayant placé, dans le goniomètre magnétique de la page 340, une sphère de pyrrhotine, dont le plan magnétique était vertical, j'ai déterminé pour tous les azimuts par rapport au champ la composante de l'aimantation parallèle au champ et la composante perpendiculaire au champ et horizontale. La *fig.* 16 montre comment la recomposition de l'aimantation résultante, à partir de ces données expérimentales anciennes et relativement peu précises, donne des points situés tous sur la trace du plan magnétique dans le plan horizontal. Chaque direction de champ fournit deux points à cause de l'hystérèse.

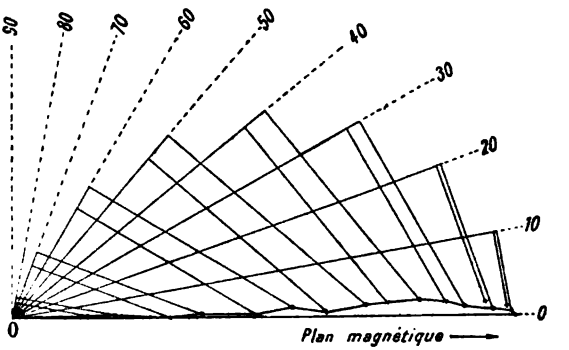


Fig. 16.

Le contrôle le plus effectif avait été obtenu en mesurant le courant induit dans une bobine placée dans le champ d'un électro-aimant, lorsqu'on y introduisait la pyrrhotine dont le plan magnétique avait été réglé perpendiculairement au champ.

Toutes ces expériences avaient été faites dans des champs relativement faibles de quelques centaines d'unités. J'ai tenté à plusieurs reprises de répéter les dernières dans des champs intenses, et je cite ici quelques-uns des résultats obtenus :

---

(1) *C. R.*, t. CXXVI, p. 1099 ; 1898. — *J. de Phys.*, 3e série, t. VIII, p. 542 ; 1899, et *Bull. de la Société de Physique*, p. 87 ; 1899.

Pyrrhotine normale (Morro Velho).

Aimantation dans le plan magnétique		Aimantation perpendiculaire au plan magnétique		En pour cent de l'aimantation dans le plan magnétique	
H = 5000	H = 10000	H = 5000	H = 10000	H = 5000	H = 10000
67,2 C. G. S.	74,7	4,76	7,23	7,1	9,7
61,2	64,8	3,95	10,22	6,45	15,8
65,1	74,1	5,95	9,74	9,1	13,2
59,3	—	4,90	—		

Pyrrhotine anormale (Bodenmais)

54,6	57,8	7,52	11,47	13,8	19,8

L'expérience donne donc une aimantation perpendiculaire au plan magnétique assez notable. Remarquons cependant que la plupart des causes d'erreurs, les erreurs de taille des disques, les erreurs d'orientation, la courbure quelquefois observée de l'édifice cristallin, les impuretés magnétiques consistant en matières étrangères ou en pyrrhotine de plan magnétique différemment orienté, tendent à faire apparaître cette aimantation. En rapprochant cette remarque de l'allure capricieuse des résultats d'expérience, on ne peut leur attribuer une portée décisive, et on doit recourir à une autre méthode.

Elle s'est présentée d'elle-même lorsque j'ai employé la méthode du couple exercé sur la substance à la détermination de la composante de l'aimantation parallèle au champ.

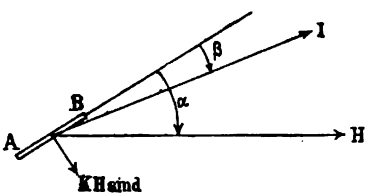


Fig. 17.

Suspendons un disque de pyrrhotine AB (*fig.* 17) dans l'appareil à aimant tournant de la page 345, son plan magnétique placé verticalement. Soient I la composante horizontale de l'intensité d'aimantation, α l'angle du champ avec le plan magnétique et C le couple exercé sur la substance. On aura, si la propriété du champ magnétique est rigoureuse :

$$C = HI \sin \alpha.$$

α étant lu sur le cercle divisé de l'aimant, I est ainsi déterminé.

Supposons maintenant que l'intensité d'aimantation s'écarte du plan magnétique d'un angle β, grâce à une faible susceptibilité k normale à ce plan. Alors :

$$\sin \beta = \frac{kH \sin \alpha}{I}$$
$$C = HI \sin(\alpha - \beta)$$

et, par suite, avec une grande approximation :

$$C = H \sin \alpha \, (I - kH \cos \alpha) ;$$

α n'a pas dépassé 10°. On peut donc, puisque kH est petit par rapport à I, écrire avec une approximation encore suffisante :

$$C = H (I - KH) \sin \alpha.$$

On mesurera donc, à la place de l'intensité d'aimantation réelle, une intensité d'aimantation apparente d'autant plus faible que le champ est plus intense.

Si les champs employés sont assez intenses pour produire la saturation, on observera par cette méthode ou une aimantation constante, ou une aimantation apparente décroissante, suivant que la susceptibilité normale sera ou ne sera pas nulle.

Plusieurs séries d'expériences m'ont paru confirmer d'abord la rigueur du plan magnétique. J'ai observé, par exemple, sur une substance normale de Morro Velho :

H	I (unité arbitraire)
1986	689
3930	732
7300	763
9150	768
10195	767
11040	765

Il est difficile d'atteindre la saturation dans un échantillon complexe formé de cristaux associés. On se place dans les conditions les plus favorables en dirigeant la plus grande composante parallèlement au champ. Mais l'étude des propriétés dans le plan magnétique a montré que l'obliquité de l'aimantation des plus petites composantes est alors loin d'être négligeable.

Ce que l'on observe est une aimantation apparente qui décroît avec le champ à cause de la susceptibilité normale et croît par suite de la saturation incomplète, et les deux effets peuvent se masquer mutuellement. Il est donc nécessaire de faire la correction des substances parasites par l'étude préalable du plan magnétique. Le résultat de ces opérations sur la substance 3, à laquelle se rapportent la plupart des mesures de ce travail, est contenu dans le tableau suivant et représenté dans la *fig.* 15, page 359.

H	Aimantation apparente brute	Aimantation apparente de la matière simple	Correction par $k = 314 \times 10^{-6}$	Aimantation corrigée
1992	43,2	45,9	0,6	46,5
4000	44,0	45,6	1,25	46,85
7310	44,3	44,9	2,2	47,2
10275	43,6	43,7	3,2	46,9
11140	43,4	43,6	3,5	47,1

L'aimantation apparente brute possède un maximum ; l'aimantation apparente de la matière simple, représentée par la courbe II, décroît régulièrement. La courbe I et la dernière colonne du tableau se rapportent à cette aimantation corrigée, par addition d'une quantité égale à 314×10^{-6}H et rendue ainsi sensiblement constante. On doit donc admettre que la susceptibilité normale au plan magnétique est égale à

$$k = 314 \times 10^{-6}.$$

Les champs normaux pour lesquels elle est observée sont compris entre 0 et 2000 gauss. Elle correspond à une aimantation de 0,67 0/0 de la saturation, pour 1000 gauss. Si elle restait constante dans les champs plus élevés, elle conduirait à la saturation pour un champ de 150000 gauss. Elle rend suffisamment compte, avec les causes d'erreur invoquées, des résultats des expériences d'induction (p. 367).

Dans les premières expériences sur le plan magnétique [1], j'avais estimé que, pour une pyrrhotine de Morro Velho, l'aimantation perpendiculaire au plan magnétique ne dépassait pas $\frac{1}{680}$ de l'aimantation dans ce plan. Cette évaluation reposait sur l'opinion que, dans le

[1] *C. R.*, t. CXXVI, p. 1099, 1998 ; — *J. de Phys.*, 3e série, t. VIII, p. 542 ; 1899, et *Bulletin des Séances de la Soc. de Phys.*, p. 87 ; 1899.

plan magnétique, la pyrrhotine pouvait être traitée, dans le cas de la sphère, comme une substance de susceptibilité notable, alors qu'en réalité elle était voisine de la saturation. La limite trouvée doit donc être portée à $\frac{3}{680}$. La détermination actuelle montre qu'elle n'est dépassée que pour des champs supérieurs à 650 unités.

Il est intéressant de comparer la susceptibilité du fer dans les composés faiblement magnétiques ou paramagnétiques à cette susceptibilité normale.

Si l'on attribue le magnétisme de la pyrrhotine uniquement au fer qu'elle contient, on obtiendra la susceptibilité spécifique χ du fer dans la pyrrhotine en divisant la susceptibilité par la densité du fer dans la pyrrhotine, qui est de 1,76.

On trouve :

$$\chi = 175 \times 10^{-6},$$

et pour la susceptibilité atomique :

$$a\chi = 56\chi = 0{,}0098.$$

Pour 9 composés ferreux et ferriques, la susceptibilité moléculaire $\chi \cdot m$ est, par atome de fer dans la molécule, comprise entre 0,0127 et 0,0151 [1]. Elle est égale à la susceptibilité atomique si l'on attribue les propriétés magnétiques uniquement au fer dans la molécule.

Rapprochons encore de ces données le paramagnétisme du fer et de la magnétite au-dessus de la température de perte du ferromagnétisme, déterminés par M. Curie. M. du Bois (*loc. cit.*, p. 486) définit la constante de Curie C par $\chi = C \times \Theta$, où Θ est la température absolue. La constante de Curie *atomique* pour le fer aux hautes températures est :

$$C \times a = 2{,}16,$$

et pour la magnétite, la constante de Curie *moléculaire* de la molécule Fe^3O^4 :

$$C \times m = 3 \times 2{,}17.$$

On déduit de ces deux valeurs remarquablement concordantes [2], par extrapolation, une susceptibilité paramagnétique du fer aux tem-

---

(1) Du Bois, *Rapports du Congrès int. de Phys.*, t. II, p. 495; 1900.
(2) Du Bois, *loc. cit.*, p. 494.

pératures ordinaires :

$$\frac{C \times a}{293} = \chi \cdot a = 0{,}0074.$$

La susceptibilité atomique du fer dans la pyrrhotine, prise normalement au plan magnétique, est donc très voisine de la susceptibilité atomique du fer dans les corps paramagnétiques.

Il convient de lever une objection. Cette susceptibilité n'a été reconnue que grâce à son anisotropie. Une susceptibilité paramagnétique isotrope, superposée aux phénomènes déjà considérés, eût passé inaperçue et doit être recherchée.

Les objections qui rendent suspecte la méthode d'induction pour l'expérience de zéro ne s'appliquent pas au même titre à l'expérience analogue pour la mesure de l'intensité d'aimantation à saturation dans le plan magnétique. J'ai trouvé ainsi, en unités arbitraires, pour la même substance :

H	Aimantation brute	Aimantation de la matière simple
1450	44,75	38,4
2945	45,72	38,4
5125	46,78	38,4
5970	47,15	38,5
6980	47,46	38,4

L'aimantation est donc parfaitement constante. *La saturation exclut donc une susceptibilité paramagnétique de même direction qu'elle, du même ordre de grandeur que celle des composés faiblement magnétiques du fer.*

Si l'on craignait d'attribuer une trop grande importance à la coïncidence numérique des susceptibilités paramagnétiques reposant sur l'étude, assez exacte il est vrai, d'une seule substance, la dernière colonne de ce tableau suffirait à montrer que le ferromagnétisme et le paramagnétisme dépendent de la même cause profonde.

Remarquons enfin que, si l'on ne disposait que des champs inférieurs à 70 gauss, le phénomène serait *linéaire*, l'aimantation ne s'écartant de la ligne de facile aimantation que d'un centième tout au plus dans le plan magnétique et d'un deux-millième perpendiculairement à ce plan.

La méthode qui résulte de cette analyse des propriétés du plan magnétique a été employée à plusieurs reprises pour la détermi-

nation de la composante de l'aimantation parallèle au champ en fonction de l'azimut du champ dans le plan magnétique. Ainsi, les courbes de la *fig.* 11 et les courbes de la *fig.* 10 qui en dérivent ont été obtenues de cette manière. A cet effet, l'appareil représenté *fig.* 18 était suspendu au ressort de torsion, le petit disque *d*, gradué sur son bord conique, placé au centre du champ. Le disque de pyrrhotine, taillé parallèlement au plan magnétique, était collé sur ce petit

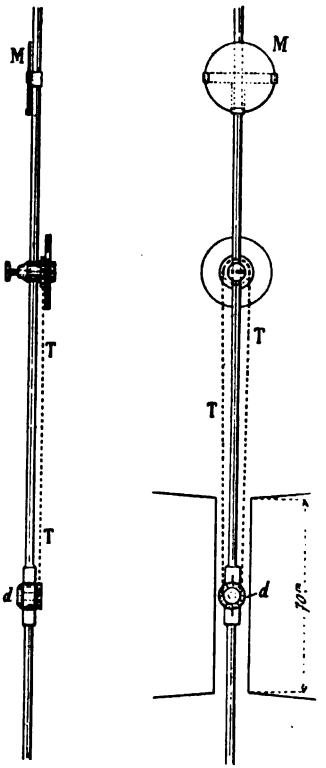


Fig. 18.

disque, que l'on pouvait faire tourner autour de son axe au moyen de la petite transmission T, sans le retirer du champ, tandis que l'on lisait sa graduation avec une loupe. L'appareil avait un frottement suffisant pour que le disque, réglé à un azimut déterminé, restât en place pendant le cours d'une expérience, consistant à observer les déviations du système suspendu au moyen du miroir M, l'aimant oc-

cupant successivement des positions écartées de $+10°$ et de $-10°$ à partir du parallélisme du champ avec le plan magnétique. Le couple mesuré a pour expression HI sin 10°, où I est la composante cherchée. Plusieurs petites corrections sont nécessaires, notamment celle de la susceptibilité normale qui a été faite avec $k = 314 \times 10^{-6}$.

Il est nécessaire, en outre, pour l'interprétation de cette méthode, de savoir si une composante du champ perpendiculaire au plan magnétique altère ou non les phénomènes dans ce plan. Le travail d'aimantation peut s'écrire, pour un cristal à trois dimensions :

$$dT = d\,(H_x I_x + H_y I_y + H_z I_z) - (I_x dH_x + I_y dH_y + I_z dH_z).$$

Soit XOY le plan magnétique, la condition dT différentielle exacte donne :

$$\frac{\partial I_x}{\partial H_z} = \frac{\partial I_z}{\partial H_x}, \qquad \frac{\partial I_y}{\partial H_z} = \frac{\partial I_z}{\partial H_x}.$$

Si I_z est constamment nul, c'est-à-dire si le plan magnétique est rigoureux, les phénomènes dans ce plan ne dépendent donc pas d'une composante normale H_z.

Si, comme cela est possible, la susceptibilité normale $k = \frac{I_z}{H_z}$ est constante avec une approximation suffisante, l'on a encore :

$$\frac{\partial I_x}{\partial H_z} = k\,\frac{\partial H_z}{\partial H_x} = 0, \qquad \frac{\partial I_y}{\partial H_z} = k\,\frac{\partial H_y}{\partial H_z} = 0.$$

Je n'ai rencontré aucun fait qui fût en désaccord avec cette hypothèse. Notamment quand, dans la méthode exposée ci-dessus, j'ai répété l'expérience en donnant au champ un mouvement d'amplitude moitié moindre à partir du plan magnétique, les résultats ont été concordants.

Mais, pour élucider définitivement ce point, de nouvelles expériences seraient nécessaires, pour lesquelles il faudrait, sans doute, des moyens d'investigation plus puissants.

L'indépendance des propriétés dans le plan magnétique de toute composante normale permet de généraliser la méthode d'observation que nous venons de développer. Au lieu de donner au champ des oscillations de petite amplitude de part et d'autre du plan magnétique, on lui fait décrire, en s'arrêtant de 10° en 10°, par

exemple, un tour complet, et on lit les couples correspondant à ces diverses positions. La composante du champ dans le plan magnétique passe alors de la valeur maxima H à zéro, et de zéro à — H, etc. On relève ainsi en une seule opération une courbe d'aimantation au sens habituel du mot. Le commencement OA de la courbe II (*fig.* 15), entre autres, a été déterminé de cette manière.

Détermination de l'aimantation de la pyrrhotine en valeur absolue.

Il suffit de déterminer en valeur absolue l'intensité à saturation pour pouvoir, par proportionnalité, y ramener les mesures relatives de toutes les intensités d'aimantation. L'intensité à saturation de l'échantillon qui a été l'objet des plus nombreuses expériences (substance 3) a été trouvée, par la méthode d'induction,

$$I_M = 47 \text{ unités C. G. S.}$$

Auparavant, l'aimantation de cette substance sans correction de l'obliquité des composantes parasites, dans un champ de 3800 gauss, avait été trouvée égale à 44,8 C. G. S. avec des appareils et une méthode opératoire différents.

Pour trois autres échantillons de Morro Velho que j'ai mesurés, j'ai trouvé des intensités supérieures :

63,6, 65,5, 72,8.

M. J. Kunz, de son côté, a trouvé pour des pyrrhotines de même origine des résultats compris entre 64,2 et 66,7, par la méthode des couples, en déterminant en valeur absolue la constante du ressort de torsion.

L'intensité à saturation de la pyrrhotine de Morro Velho, tout en étant toujours du même ordre de grandeur, ne semble donc pas être invariable d'un échantillon à l'autre.

L'intensité à saturation des pyrrhotines anormales est extrêmement variable, elle est comprise, pour les échantillons qui ont été l'objet de déterminations absolues, entre 18,3 et 128.

PHÉNOMÈNES RÉSIDUELS.

Dans l'exposé des résultats de l'étude magnétique de la pyrrhotine j'ai fait abstraction des phénomènes résiduels. Cela a été possible parce que les champs auxquels font appel les phénomènes magnéto-cristallins sont beaucoup plus considérables que ceux que font intervenir les phénomènes résiduels. Dans l'échantillon étudié le plus complètement, le champ démagnétisant maximum, dû à la structure, est de 7300 gauss, tandis que le champ coercitif maximum a été de 15,4 gauss. L'hystérèse est donc en quelque sorte une broderie légère qui se superpose à la partie réversible du phénomène en la modifiant à peine.

J'ai montré que, si l'on considère la direction de facile aimantation contenue dans le champ magnétique, on peut admettre, grâce à une hypothèse très plausible sur le rôle des discontinuités, telles que les cassures, et des dimensions finies de l'échantillon, que la courbe

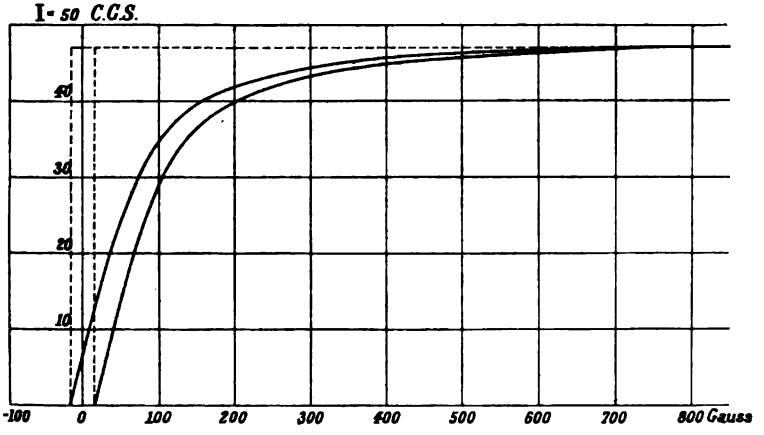


Fig. 19.

d'aimantation de la matière parfaitement continue et illimitée se composerait d'une première partie coïncidant avec l'axe des aimantations et d'une deuxième parallèle à l'axe des champs, et représentant l'aimantation à saturation restant constante depuis le champ zéro jusqu'au champ infini. La courbe expérimentale (*fig.* 19) est assez voi-

sine de cette courbe d'aimantation schématique ; mais, en réalité, elle se compose d'une branche ascendante et d'une branche descendante distinctes. Ce qui frappe à première vue dans cette courbe, c'est l'écartement très approximativement constant des deux branches, mesuré parallèlement à l'axe des abscisses, et égal à 30,8 gauss.

Avec la schématisation que nous venons de rappeler et en tenant compte de l'hystérèse, la courbe d'aimantation devient donc le rectangle représenté en pointillé.

Ce premier résultat s'interprète en disant que, pour déplacer l'extrémité du vecteur aimantation le long du diamètre de facile aimantation, il faut surmonter un champ coercitif constant $H_C = 15,4$ gauss.

L'énergie dépensée par cycle dans l'unité de volume est, par suite :

$$E = 4 \,.\, H_C \,.\, I_M = 4 \,.\, 15,4 \,.\, 47 = 2900 \text{ ergs.}$$

En dehors de la direction de facile aimantation, la connaissance de l'aimantation dans le plan magnétique a été obtenue en faisant tourner dans ce plan des champs de grandeur constante. On doit attendre de ces expériences des renseignements sur l'hystérèse que l'on a appelée tournante, par opposition avec l'hystérèse alternative que nous venons de considérer.

Au même titre schématique, quand le champ constant, partant de la direction OX (*fig.* 20) de facile aimantation, décrit l'angle XOY, l'aimantation décrit l'arc AB du cercle de saturation. Puis, le champ dépassant la direction de difficile aimantation OY, l'aimantation

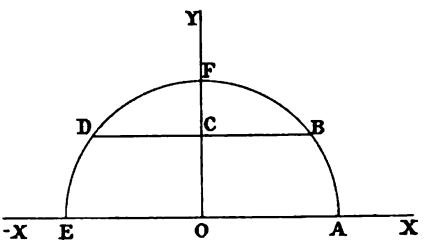


Fig. 20.

décrit instantanément la corde BCD, et, lorsque le champ décrit l'angle YO (— X), l'aimantation décrit l'arc DE.

Pour ces déplacements de l'extrémité du vecteur aimantation I, les phénomènes d'hystérèse se manifestent par des courbes différentes à

l'aller et au retour, tant pour la composante de l'aimantation parallèle au champ que pour la composante perpendiculaire au champ. La *fig.* 21 représente cette dernière en fonction des azimuts du champ, égal à 593 gauss pour la pyrrhotine de Morro Velho. On voit que les deux courbes coïncident exactement sur une assez grande longueur dans le voisinage de la direction OX indiquée par M sur la figure. D'autre part, la grandeur de l'aimantation restant constante et égale à l'intensité à saturation I_M dans le voisinage de OX, il en résulte que la région du cercle de saturation voisine de A est décrite sans hystérèse.

Si ces expériences étaient faites sur un cristal simple, il serait facile de fixer jusqu'à quel point du cercle de saturation cette nullité de l'hystérèse persiste; mais, comme tous les résultats doivent subir la

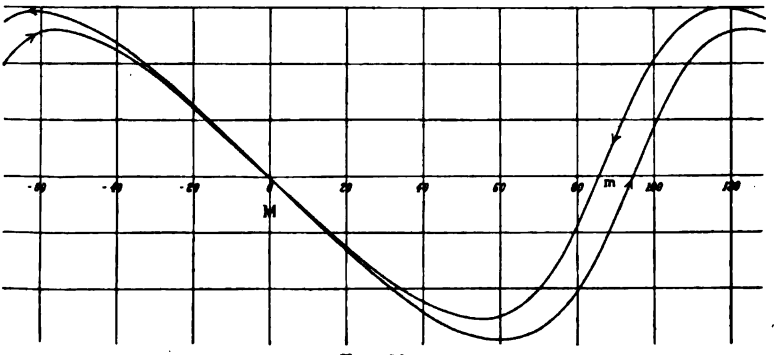


Fig. 21.

correction nécessitée par la présence de cristaux parasites, cette limite ne peut être marquée avec certitude. Des expériences dont nous parlerons plus loin ayant montré que l'hystérèse s'annule lorsque, dans un champ très intense, l'aimantation décrit le cercle de saturation tout entier, il est naturel de supposer que, lorsque dans un champ plus faible; l'aimantation ne décrit que l'arc AB de ce cercle, l'hystérèse restera nulle jusqu'en B.

La *fig.* 21 montre que, dans le voisinage de la direction OY marquée par *m*, les deux courbes sont nettement différentes. Leur écartement est d'autant plus grand que le champ avec lequel on opère est plus faible; mais, quel que soit ce champ, la courbe correspondant à l'aller peut se superposer sur une grande étendue à celle du retour, par un déplacement horizontal.

Il faut donc, pour obtenir une même valeur de l'aimantation perpendiculaire au champ à l'aller et au retour, faire agir des champs qui diffèrent en direction d'un angle constant. Cet énoncé peut être remplacé par un autre équivalent. En effet, dans le voisinage de la direction de difficile aimantation OY, la vitesse de rotation de l'aimantation est beaucoup plus grande que celle du champ. Il suffira donc, en partant de deux directions du champ correspondant à des ordonnées égales sur les courbes d'aller et de retour, de faire tourner l'une de ces directions d'un angle extrêmement petit pour amener les aimantations à coïncider. Nous pouvons donc remplacer la proposition suggérée d'abord par l'aspect général des courbes par la suivante : Pour une aimantation représentée par un même point de la corde BCD, les champs diffèrent à l'aller et au retour d'un angle constant ; ou encore, puisque toute la corde BCD est décrite pendant que le champ est voisin de OY : Pour un même point de la corde BCD, les champs diffèrent à l'aller et au retour d'un champ constant dirigé suivant BCD. On est donc amené à imaginer que, *pour déplacer l'extrémité du vecteur* I *le long de* BCD, *il faut, en plus du champ exigé par le phénomène réversible, surmonter un champ coercitif constant* H_C' *agissant en sens contraire du mouvement.*

Cette hypothèse est suggérée nettement par l'expérience, sans être imposée absolument. Les mesures ne sont pas assez précises pour que l'on puisse se proposer d'y trouver un contrôle numérique de la constance du champ coercitif dans toute l'étendue de la corde BCD.

Mais l'expérience donne des déterminations relativement précises de ce champ coercitif H_C' au point C, pour les diverses valeurs du champ.

Soit $2\alpha_C$ le double angle coercitif, c'est-à-dire l'écartement angulaire constant entre les deux branches de la courbe des composantes de l'aimantation perpendiculaire au champ, ou, ce qui revient au même, de la courbe des couples en fonction de α.

Soit $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\alpha}$ le rapport des vitesses de rotation de l'aimantation et du champ dans le voisinage de OY. Le point sur l'axe des abscisses correspond à la coïncidence de la direction du champ et de l'aimantation, puisque l'aimantation perpendiculaire au champ y est nulle. Il faudra, pour amener, à partir de ce point, l'aimantation sur l'axe de y, faire tourner le champ de $\alpha_C \times \frac{\Delta\alpha}{\Delta\varphi}$. Il ne sera donc plus qu'à une dis-

tance angulaire de $\alpha_C \left(1 - \frac{\Delta\alpha}{\Delta\varphi}\right)$ de cet axe, et le champ coercitif est :

$$H_C' = \alpha_C \left(1 - \frac{\Delta\alpha}{\Delta\varphi}\right) \cdot H.$$

Le tableau suivant donne le résultat de ces déterminations pour le disque de Morro Velho, par la méthode des couples.

H	$2\alpha_C$		$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\alpha}$	H_C'	I_y
—	—		—	15,4	0
1992	0°,61		36,2	10,8	13,7
4000	0°,22		18	7,9	25,3
7310	0°,05		5,4	2,6	41,7
10275	0°,037	incertains	3,1	2,3	45,8
11140	0°,025	incertains	2,8	1,5	46

Des expériences plus anciennes faites sur la même substance par la méthode balistique, qui se prête moins bien à la détermination des champs coercitifs, ont donné :

H	$2\alpha_C$		H_C'	I_y
97,2	18°		15,2	0,6
194	8°,9		15,05	1,2
564	2°,6		12,8	3,6
2250	0°,47	incertains	9,2	15
3830	0°,27	incertains	9	24

Dans la *fig.* 22, j'ai porté les aimantations au minimum I_y en abscisses et les champs coercitifs en ordonnées. Les points de la première série sont marqués par + et ceux de la deuxième par ⊙. Ces derniers sont moins exacts que les premiers.

Dans les champs faibles, $2\alpha_C$ a des valeurs considérables, et la détermination est relativement précise ; dans les champs les plus intenses, $2\alpha_C$ tombe à quelques centièmes de degré, qui peuvent être dus en grande partie à la torsion résiduelle du ressort spiral qui, négligeable en général, pouvait fort bien réapparaître dans cette détermination particulière, faite comme pour la mettre en évidence. Mais l'incertitude des points correspondant aux champs élevés est rachetée par la connaissance du point extrême ($H_C = 0$, $I_y = I_M = 47$), qui résulte de la propriété du champ coercitif d'être nul le long du cercle

de saturation. L'ensemble des résultats de la *fig.* 22 s'interprète par la proposition : *Le champ coercitif* H_C' *décroît linéairement avec la flèche de la corde du cercle de saturation décrite par l'aimantation.*

Par conséquent :

$$H_C' = H_C \frac{I_M - I_y}{I_M}. \tag{7}$$

L'énergie d'hystèrèsepar cycle est égale à H_C' multiplié par deux fois la longueur de la corde, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} E' &= 4H_C'I_M \sqrt{1 - \left(\frac{I_y}{I_M}\right)^2} \\ &= 4H_CI_M \left(1 - \frac{I_y}{I_M}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{I_y}{I_M}\right)^2}. \end{aligned} \tag{8}$$

Le phénomène que je viens d'exprimer quantitativement par cette formule ne saurait s'appeler hystérèse tournante sans impropriété de langage, puisque la rotation de l'aimantation le long du cercle

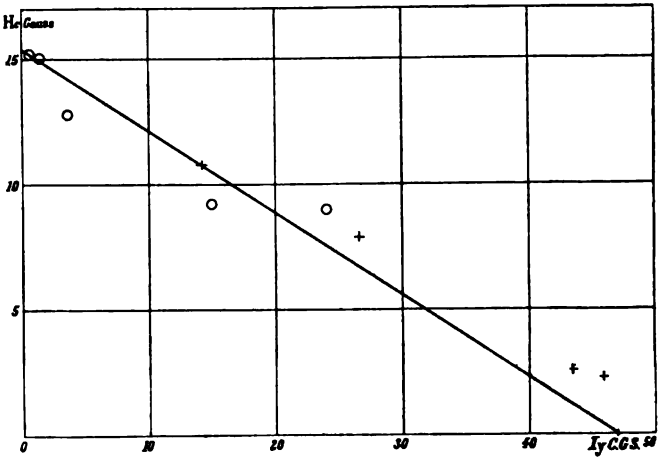


Fig. 22.

de saturation a lieu sans hystérèse et que celle-ci n'apparaît que quand la rotation est accompagnée d'un changement de grandeur de l'aimantation.

L'une des difficultés dans la détermination de ces phénomènes d'hystérèse est, nous l'avons déjà dit, la nécessité de tenir compte de

la complexité des cristaux naturels et de ramener par des réductions laborieuses les résultats à ce qu'ils seraient si le cristal était simple. La mesure globale de l'énergie d'hystérèse E′ échappe à cette difficulté. Elle s'ajoute pour les différents éléments constituants du groupement cristallin et peut être déterminée aussi bien sur les échantillons les plus complexes que sur ceux qui sont d'une simplicité relative.

J'ai employé à cet effet un appareil qui dérive de l'hystérésimètre Blondel-Carpentier, en y remplaçant l'aimant permanent par un électro-aimant. Cet appareil sera décrit ultérieurement en détail. Voici le principe sur lequel il repose. Le travail dépensé par le champ extérieur sur le cristal comprend le travail d'aimantation et l'accroissement d'énergie mutuelle du champ et de l'aimant[1]. Ce travail *total* est, pour un phénomène plan :

$$d\mathfrak{T} = \mathrm{I}d\mathrm{H} + \mathrm{HI}\sin(\alpha - \varphi)\,d\alpha,$$

où α et φ sont les angles de H et de I avec une direction fixe dans le cristal, contenue dans le plan. Quand le champ est constant, il se réduit à

$$d\mathfrak{T} = \mathrm{HI}\sin(\alpha - \varphi)\,d\alpha.$$

Ce travail est nul pour un cycle isothermique réversible, et, par conséquent, pour un tour complet du champ, quand il n'y a pas d'hystérèse. Il est même nul pour un demi-tour, puisque les phénomènes se reproduisent à 180° de distance. Quand l'hystérèse se surajoute au phénomène réversible, $\int \mathrm{HI}\sin(\alpha - \varphi)\,d\alpha$ cesse d'être nul, et il suffit de mesurer l'aire de la courbe représentant les couples $\mathrm{HI}\sin(\alpha - \varphi)$ en fonction de α, avec le planimètre, pour avoir l'aire d'hystérèse. On peut répéter cette opération sur la courbe décrite en sens inverse. Quand on opère avec le planimètre, il est commode et plus précis de combiner les deux opérations en intégrant la différence des couples à l'aller et au retour. On obtient alors, dans un intervalle de 180°, l'énergie correspondant à un cycle complet.

L'hystérésimètre donne par une lecture unique le résultat de cette intégration.

---

[1] Voir *C. R.*, CXXXVIII, p. 35; 1904; — *J. de Phys.*, 4e série, t. III, p. 194; 1904.

Pour la discussion de ces expériences, il est commode d'exprimer E′ de la formule (8) au moyen de la variable indépendante en observant que :

$$H = (N + n)\, I_y, \tag{9}$$

où N est constant et n une fonction connue de H. Si la substance était illimitée et parfaitement continue, on aurait :

$$H = NI_y \tag{10}$$

et

$$E' = 4H_C I_M \left(1 - \frac{H}{NI_M}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{H}{NI_M}\right)^2}. \tag{11}$$

La courbe en trait plein de la *fig.* 23 est la représentation graphique de la formule (11). Les points +, voisins de cette courbe, sont les résultats des mesures faites avec l'hystérésimètre. Ils ont subi la correction $-nI_y$ sur le champ, nécessitée par le caractère approché de l'équation (10) et empruntée à la courbe I, page 359. Cette correc-

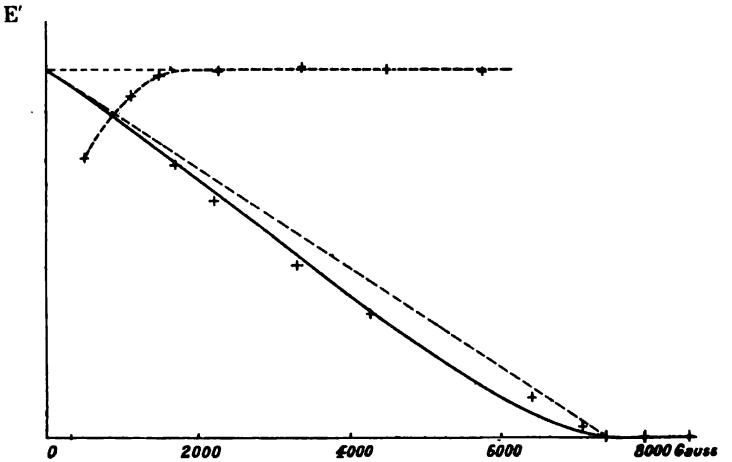


Fig. 23.

tion est certainement trop faible, l'échantillon ayant été cassé depuis les premières expériences.

L'échelle des abscisses pour la construction de la courbe est donnée par la valeur connue de $NI_M = 7\,300$.

L'échelle des ordonnées peut être déterminée expérimentalement d'une manière indépendante. Si l'on place le plan magnétique de la substance verticalement dans le champ tournant horizontal de l'hystérésimètre, à chaque tour de celui-ci le vecteur aimantation décrit dans les deux sens le diamètre de facile aimantation BC (*fig.* 24) et deux arcs AB et CD du cercle de saturation, plus ou moins étendus suivant la grandeur du champ, et cela quelle que soit la direction du dia-

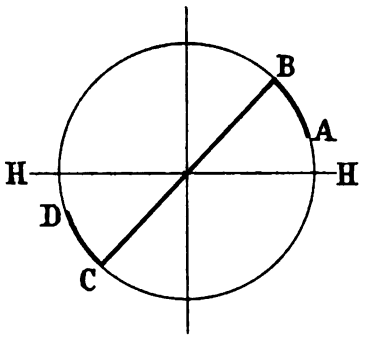


Fig. 24.

mètre de facile aimantation dans le plan vertical. L'énergie d'hystérèse dite « tournante » est donc égale dans ce cas à celle de l'hystérèse alternative suivant le diamètre de facile aimantation ; elle est donc indépendante du champ et égale à l'ordonnée à l'origine de la courbe représentant la formule (11) (*fig.* 23). Et cela est vrai aussi bien pour un cristal complexe. C'est bien ce que donne l'expérience, comme le montrent les points + sur la courbe supérieure pointillée, de la *fig.* 23. Les premiers seuls se trouvent au-dessous de la droite horizontale passant par les suivants. Cela tient à ce que, dans les champs faibles, la saturation n'est pas atteinte par suite des phénomènes démagnétisants et qu'une partie seulement du diamètre de facile aimantation est décrite.

Malheureusement le disque de pyrrhotine des premières expériences avait été détruit accidentellement avant cette dernière série de mesures dans laquelle le plan magnétique est placé verticalement. Elle a été exécutée avec un autre disque de la même origine et ayant approximativement les mêmes dimensions. En attendant que de nouvelles expériences actuellement en voie d'exécution conduisent à un contrôle plus serré des lois de l'hystérèse, on voit que celles-ci

sont dès à présent confirmées quand à leur allure générale et à la nullité de l'hystérèse tournante au-dessus de H = 7300 gauss.

L'emploi de cette méthode suppose que les phénomènes d'hystérèse, comme les autres phénomènes d'aimantation, ne sont pas altérés par une composante du champ perpendiculaire au plan magnétique. Les considérations énergétiques sur lesquelles nous nous sommes appuyé n'ayant aucune prise sur le phénomène irréversible, l'expérience peut seule trancher la question. La *fig.* 25

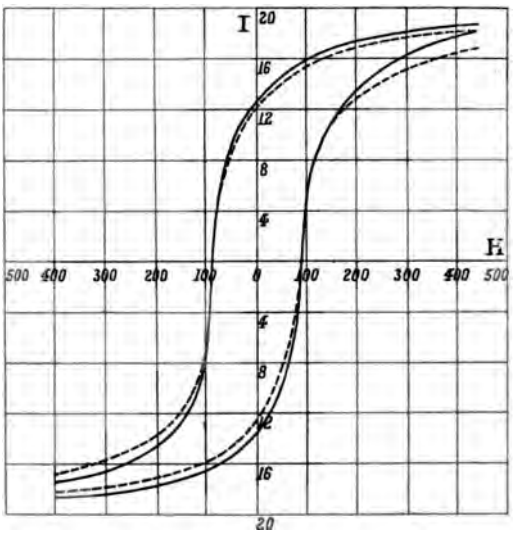


Fig. 25.

montre la courbe cyclique d'une pyrrhotine (New-Jersey) légèrement anormale, à champ coercitif considérable, relevée (traits pleins) avec un champ magnétique perpendiculaire au plan égal à 1905 gauss, et (traits pointillés) avec un champ perpendiculaire égal à 3620 gauss. Les deux courbes ne se superposent pas, sans doute à cause de la susceptibilité perpendiculaire au plan magnétique, plus grande dans les substances anormales, mais elles montrent que l'hystérèse n'est pas altérée. Cette expérience déjà ancienne et faite avec des moyens d'observation encore imparfaits m'a paru concluante, mais elle pourrait être reprise avec plus de précision.

LES SUBSTANCES ANORMALES.

Au début de cette étude j'ai déjà indiqué que les cristaux compacts du Brésil et les masses feuilletées de diverses origines ont des propriétés différentes. Un travail fait en collaboration avec M. J. Kunz sur « Les variations thermiques de l'aimantation de la pyrrhotine [1] » nous a montré l'irréductibilité des propriétés de ces deux espèces de pyrrhotines. Celles de la deuxième, que j'ai appelées anormales, ne donnent, même à la température ordinaire, qu'une image vague et profondément troublée des propriétés si nettes de la pyrrhotine normale. Mais, comme ces pyrrhotines sont celles que l'on se procure le plus facilement et que, par un hasard peu avantageux, j'ai commencé par leur consacrer beaucoup de temps, je crois utile de résumer brièvement leurs propriétés.

Plan magnétique. — Déjà dans les champs faibles la propriété du plan magnétique n'est pas exacte. J'ai indiqué précédemment [2], pour l'aimantation perpendiculaire au plan magnétique

$\frac{1}{15}$ pyrrhotine de Bodenmais (Bavière),
$\frac{1}{17}$ — New-Jersey,
$\frac{1}{42}$ — Norwège,

de l'aimantation parallèle au plan, pour des champs peu intenses dans lesquels je n'avais pu découvrir aucune aimantation perpendiculaire au plan magnétique dans les pyrrhotines normales.

Dans les champs plus intenses, le critérium de la saturation apparente constante ou décroissante (ce mémoire, p. 367) est nettement en défaut. Il n'est même pas nécessaire, pour le constater, de ramener les mesures à ce qu'elles seraient pour un échantillon cristallographiquement simple. J'ai trouvé, par exemple :

---

(1) *C. R.*, t. CXLI, p. 182; 1905. — Ce travail parait *in extenso* à la suite du présent mémoire.

(2) *C. R.*, t. CXXVI, p. 1099; 1898; — *J. de Phys.*, 3e série, t. VIII, p. 542; 1899; et *Bul. des Séances de la Soc. de Phys.*, p. 87; 1899.

H	I
1986 gauss	352 unités arbitraires
3930	360
7300	357
9150	354
10195	352
11140	350

Phénomènes démagnétisants. — Dans le plan magnétique, on rencontre les mêmes groupements cristallins, et l'on peut, comme pour la pyrrhotine normale, déduire les propriétés de la substance simple de celles de la substance complexe.

Mais la loi du champ démagnétisant :

$$H_D = NI \sin \varphi,$$

cesse d'être vérifiée. La formule plus générale :

$$H_D = f(I \sin \varphi),$$

représentant la loi du phénomène démagnétisant le plus général dirigé suivant la direction de difficile aimantation, ne satisfait pas non plus aux faits.

On peut, dans ce cas [1], avoir recours à une surface obtenue en portant en chaque point du plan magnétique une ordonnée égale à l'énergie d'aimantation, pour représenter l'ensemble des propriétés du cristal dans le plan magnétique. Cette surface, à son tour, peut être représentée par ses courbes de niveau. J'ai fait cette détermination assez laborieuse pour deux échantillons (substances, 1 et 2, p. 349), mais je puis me dispenser de reproduire ici cette image, car, à première vue, elle ne se distingue pas de celle d'une pyrrhotine normale qu'il est aisé de décrire.

Dans cette dernière, en effet, l'énergie se compose de la somme de deux termes : d'abord le travail de H_I qui conduirait à une surface de révolution, et celui de H_D qui fournit le terme :

$$E = \frac{1}{2} NI_y^2,$$

représenté par un cylindre parabolique dont la génératrice, lieu des

(1) Voir *C. R.*, CXXXVIII, p. 35 ; 1904 ; — *J. de Phys.*, 4e série, t. III, p. 194 1904.

sommets, coïncide avec la direction de facile aimantation. Cette dernière partie de l'énergie est la plus importante.

Phénomènes résiduels. — Les phénomènes résiduels sont beaucoup plus intenses dans les pyrrhotines anormales que dans les pyrrhotines normales. Il semble aussi y avoir un champ coercitif constant le long du diamètre de facile aimantation et le long des cordes parallèles à ce diamètre. Ce champ décroît quand I_y croît, et l'énergie d'hystérèse dépensée le long de la corde tend vers zéro avec la longueur de cette corde.

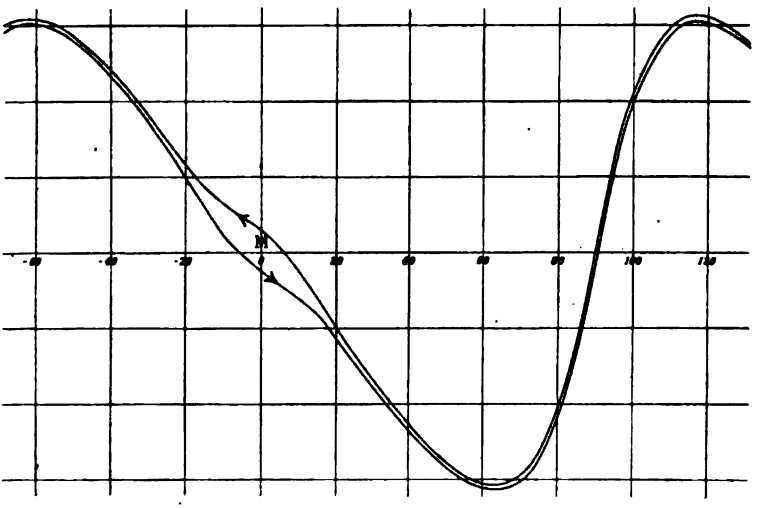


Fig. 26.

Mais il se présente en outre un autre phénomène d'hystérèse qui se manifeste, dans les courbes représentant les couples en fonction des azimuts du champ α, par un écart entre les deux courbes d'aller et de retour dans le voisinage du maximum d'aimantation M (*fig.* 26). La *fig.* 26 se rapporte à des expériences faites dans un champ de 11140 gauss. Cet écart va en croissant avec le champ, et dans certains cas il s'accroît avec le nombre de cycles décrits. Ce phénomène possède donc une sorte de viscosité. Il serait prématuré d'en chercher une explication, mais on peut soupçonner qu'il dépend des changements d'état magnétique que le travail cité plus haut a fait découvrir dans les substances anormales.

Résultats numériques. — Pour terminer ce qui concerne les subs-

tances anormales, je condense quelques résultats de mesures relatifs aux deux substances de New-Jersey, qui ont été l'objet d'une étude détaillée et qui ont été déjà mentionnées page 349, dans les tableaux suivants. Les intensités d'aimantation sont exprimées en unités arbitraires.

Substance 1, $I_M = 442$.

H	H_D au minimum	$H \times \frac{I_M}{I_y}$	I_y	H_c'
0	0	—	0	75 gauss
627 gauss	604,5 gauss	3110 gauss	85,4	61,5
1270	1220	3760	142,8	45,2
2525	2375	4520	231	29
3950	3610	5150	308	—
4905	4357	5440	352	—
5760	4917	5680	381	—
7425	5665	5920	416	—

Substance 2, $I_M = 440$.

H	H_D au minimum	$H_D \times \frac{I}{I_y}$	I_y	H_c'
176 gauss	—	—	—	92 gauss
562	550 gauss	3140 gauss	70	86
1171	1130	3910	127	65
2005	1895	5050	167	42
3945	3600	5280	300	—
7327	5450	5710	420	—
9240	5880	5990	432	—
10310	5960	6070	432	—
11140	5880	5960	434	—

Les champs désignés par H_D ont été déterminés, par analogie avec les champs démagnétisants au minimum dans la pyrrhotine normale, au moyen du rapport de la vitesse de rotation de l'aimantation et du champ dans le voisinage de la direction de difficile aimantation. On a en effet $H_D = H\left(1 - \frac{\Delta\alpha}{\Delta\varphi}\right)$ (Voir p. 363). La troisième colonne montre que ces champs sont loin d'être proportionnels aux I_μ, comme cela avait lieu pour la pyrrhotine normale.

Pour la substance 1, l'aimantation à saturation a été trouvée égale à 1,84 unité C. G. S. La substance 2 était un autre fragment du même cristal.

SCHÉMA MOLÉCULAIRE.

Afin de grouper autour d'une représentation sensible les propriétés du cristal de pyrrhotine, imaginons qu'il soit composé de files de petites aiguilles aimantées équidistantes, alignées dans la direction de facile aimantation et dont les axes de rotation soient perpendiculaires au plan magnétique. Supposons ces aimants petits par rapport aux distances qui les séparent et assez intenses pour exercer les uns sur les autres une action directrice. Admettons en outre que, par suite

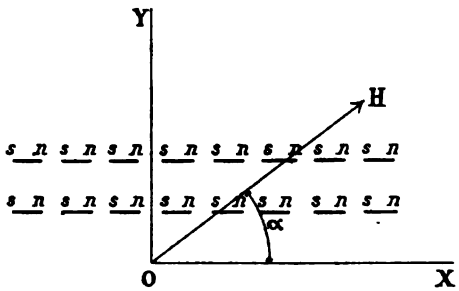


Fig. 27.

d'une compensation ou d'une plus grande distance, les files soient sans action les unes sur les autres. Livrés à eux-mêmes, les aimants d'une file adopteront une position d'équilibre dans laquelle le pôle nord de chaque aimant est en face du pôle sud de l'aimant suivant (*fig.* 27). Faisons agir sur le système ainsi constitué un champ H sous un angle α avec la direction des files. Les aimants seront déviés d'un angle φ. Soit μ le moment magnétique d'un aimant élémentaire; l'ensemble de la file exerce alors sur chaque petit aimant un champ magnétisant $A\mu \cos\varphi$, et dans la direction OY un champ démagnétisant $-B\mu \sin\varphi$, où A et B sont des constantes.

L'équation d'équilibre de cet aimant est donc :

$$(H \cos\alpha + A\mu \cos\varphi) \sin\varphi = (H \sin\alpha - B\mu \sin\varphi) \cos\varphi$$

ou

$$H \sin(\alpha - \varphi) = (A + B)\, \mu \sin\varphi \cos\varphi.$$

Or la loi démagnétisante que nous avons trouvée expérimentale-

ment s'exprime, en considérant dans la *fig.* 13 (p. 354) le triangle OAB, par :

$$(a) \qquad H \sin(\alpha - \varphi) = NI \sin\varphi \cos\varphi.$$

En posant :

$$(b) \qquad NI_M = (A + B)\,\mu,$$

le schéma moléculaire donne donc précisément la loi expérimentale pour les points situés sur le cercle de saturation.

L'intensité d'aimantation à saturation est égale à la somme des moments magnétiques des aimants élémentaires contenus dans l'unité de volume. Il résulte donc de l'équation (*b*) qu'alors même que la valeur de μ changerait, par la variation de la température par exemple, N reste constant tant que la structure de la substance est invariable.

La loi démagnétisante ainsi retrouvée exprime que, lorsqu'un champ constant H décrit un quart de tour à partir de OX (*fig.* 20, p. 376) l'aimantation décrit un arc AB du cercle de saturation.

Cherchons à nous représenter comment l'aimantation pourra décrire soit le diamètre de facile aimantation AE, soit la corde BCD.

Si l'on fait agir sur les files d'aimants élémentaires dans leur position d'équilibre OX un champ croissant dirigé suivant O (— X), quand il atteindra une certaine valeur H_C leur équilibre deviendra instable et tous les aimants pivoteront de 180°. Le travail du champ extérieur, égal au champ coercitif multiplié par $2I_M$, sera absorbé dans l'amortissement de leurs mouvements.

Ce même phénomène se produisant *successivement* pour les différentes files, mais pour la même valeur, ou du moins des valeurs extrêmement voisines de H_C, le vecteur I décrira le diamètre de facile aimantation. Le schéma moléculaire rend ainsi compte de la constance du champ coercitif le long de ce diamètre.

On peut remarquer l'analogie que ce changement d'orientation présente avec un changement d'état. Comme dans la transformation d'un liquide en vapeur saturante de même température, ce sont les portions successives du corps qui subissent la même transformation, et pendant cette transformation le champ coercitif, comme la pression de la vapeur, reste constant.

Lorsqu'un champ constant H aura décrit un quart de tour dans le plan à partir de OX, les aimants élémentaires se trouveront dans une

position d'équilibre déterminée par l'équation (a) et pour laquelle :

$$\sin\varphi = \frac{H}{NI_M}.$$

Pour le même champ, il y a une deuxième position d'équilibre symétrique de la première par rapport à OY. On peut imaginer qu'un champ H_C' dirigé suivant O (— X) fasse passer successivement les différentes files de la première de ces positions d'équilibre à la seconde. S'il en est ainsi, le phénomène d'hystérèse le long de la corde BD (*fig.* 20) doit encore correspondre à un champ coercitif constant, ce qui est d'accord avec l'expérience.

La petitesse du champ coercitif, 15,4 gauss, dans la substance étudiée, en comparaison du champ démagnétisant maximum de 7300 gauss, est un des aspects caractéristiques des phénomènes. Je n'ai pas réussi, jusqu'à présent, à le déduire quantitativement de cette représentation schématique, mais il est permis de penser qu'il est en relatioh avec ce qui se passe dans la région troublée des extrémités des files.

Si le champ coercitif est dû à l'action mutuelle des aimants élémentaires, il doit être, à structure égale, proportionnel à μ. La vérification de cette proposition est accessible à l'expérience (1).

Il est possible aussi que les substances anormales, dont les exemples m'ont toujours été fournis par des échantillons de structure feuilletée, doivent une partie de leurs propriétés à la multiplication de ces régions troublées, conséquence de la discontinuité de la matière.

En cherchant parmi les courbes d'aimantation qui ont été publiées pour le fer et les autres métaux ferromagnétiques, on en trouverait sans doute plus d'une qui permettrait des rapprochements avec les propriétés de la pyrrhotine et avec le schéma qui les représente. Je ne citerai à titre d'exemple que les cycles d'hystérèse obtenus par M. Ch. Maurain pour le fer électrolytique déposé dans un champ magnétique de quelques gauss. La *fig.* 28 est empruntée au mémoire de M. Maurain (2) ; elle représente une courbe cyclique d'hystérèse alternative relevée dans la direction du champ agissant pen-

(1) Voir à ce sujet, comme pour la proposition analogue relative à NI_M, le travail suivant *Sur les variations thermiques de l'aimantation de la pyrrhotine.*

(2) *J. de Phys.*, 3e série, t. X, p. 123; 1901.

dant l'électrolyse. Il n'est pas bien surprenant que cette direction ait des propriétés communes avec la direction de facile aimantation de la pyrrhotine. Comme nous l'avons trouvé pour celle-ci, nous retrouvons ici une saturation constante, entre la saturation positive et néga-

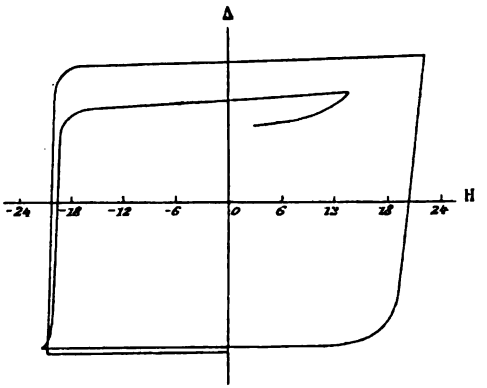


Fig. 28.

tive des variations très rapides de l'intensité d'aimantation que les phénomènes démagnétisants provenant de la structure et de l'étendue limitée du dépôt empêchent peut-être seuls d'être instantanées, et une largeur très sensiblement constante du cycle d'hystérèse.

Les variations thermiques de l'aimantation de la pyrrhotine ;

Par MM. Pierre Weiss et J. Kunz.

La méthode expérimentale employée dans le présent travail repose sur la propriété du cristal de pyrrhotine de ne prendre d'aimantation que dans un plan, quelle que soit la direction du champ. Ce plan magnétique est le plan de base du prisme hexagonal dont les cristaux de pyrrhotine semblent dériver. Dans les masses feuilletées à structure cristalline, il est parallèle aux plans de discontinuité de la substance. Rappelons brièvement en quoi consiste cette méthode et dans quelle mesure elle est applicable. Suspendons le cristal de pyrrhotine dans un champ magnétique H horizontal, son plan magnétique AB étant vertical.

Le couple exercé sur lui a pour expression :

$$HI \sin \alpha,$$

où I est la composante horizontale de l'intensité d'aimantation, α l'angle du champ avec le plan magnétique. La mesure de ce couple et de α donne donc I.

Lorsque la propriété du plan magnétique n'est pas rigoureuse et qu'il existe une petite susceptibilité k perpendiculaire à ce plan, cette mesure donne, à la place de l'intensité d'aimantation I, une intensité apparente [1]

$$I - kH \cos \alpha,$$

que l'on peut souvent remplacer avec une approximation suffisante par :

$$I - kH.$$

Cette expression montre que, dans le cas où l'aimantation à saturation est atteinte, la saturation apparente décroît linéairement en fonction du champ. C'est ce critère qui a permis de reconnaître que la pyrrhotine en cristaux compacts de Morro Velho a, perpendiculairement au plan magnétique, une susceptibilité atomique du même ordre de grandeur que celle des composés paramagnétiques du fer.

On devrait donc, pour ces substances, faire une légère correction ramenant l'intensité d'aimantation apparente à l'intensité vraie. Nous nous en sommes dispensés ; elle est en général d'environ 1 0/0 et, dans les champs les plus intenses qui ont atteint 3000 gauss, elle ne dépasse guère 3 0/0. Nous n'avons pas cherché à dépasser la précision nécessaire à une première exploration.

C'est l'étude thermique qui nous a révélé la différence profonde de propriétés de ces pyrrhotines normales et des masses feuilletées de Morro Velho, de New-Jersey et de Bodenmais, que nous avons appelées anormales. Mais déjà, à la température ordinaire, la propriété du plan magnétique est plus grossièrement approchée pour ces dernières [2]. Ce caractère s'accentue aux températures plus élevées, et

---

(1) Voir p. 368.
(2) Voir plus loin, p. 407.

le plan magnétique ne peut être considéré que comme un plan d'aimantation maxima. La méthode expérimentale n'ayant pas été changée, nous avons tenu compte, dans l'interprétation, de la signification moins simple des résultats expérimentaux.

Les expériences préliminaires. — Le champ magnétique était obtenu dans les premières expériences au moyen d'un électro-aimant en fer à cheval, de construction ancienne, dont les noyaux ont 9 centimètres de diamètre et qui donne, dans un entrefer de plus de 5 centimètres, des champs pouvant atteindre 2000 gauss. Entre les armatures polaires était placé un cylindre de porcelaine de 4 centimètres de diamètre et de 20 centimètres de hauteur, rempli d'une huile spéciale employée au graissage des cylindres de moteurs à gaz et supportant des températures relativement élevées. Ce bain d'huile était chauffé au moyen d'un brûleur à gaz. En ayant soin d'agiter, on maintenait la température constante, à un degré près, pendant des heures, même au-dessus de 330°.

La substance, placée au milieu du champ magnétique et du bain d'huile, était portée par une tige de cuivre suspendue à un ressort en hélice, moitié droite, moitié gauche, pour éliminer les déplacements de zéro dus aux fluctuations de la température. Cette tige porte un miroir pour la lecture des déviations. Le plan magnétique de la substance était vertical et faisait, avant l'excitation de l'aimant, un angle fixe α, de 10° environ, avec le champ de celui-ci. Le champ étant établi, on observait, en fonction de la température, les petites déviations proportionnelles à l'intensité d'aimantation. Une correction nécessitée par l'altération que ces petites déviations apportent à l'angle α a été faite.

L'expérience a porté sur un certain nombre de disques taillés parallèlement au plan magnétique et de fragments clivés. Ils étaient choisis parmi ceux dans lesquels une des trois composantes du groupement cristallin dans le plan magnétique prédomine. La direction de facile aimantation de la composante dominante était placée horizontalement. Ce sont ces expériences qui ont montré l'irréductibilité des propriétés des deux espèces de pyrrhotine.

Nous donnons plus loin (*fig.* 3 et 6) la courbe typique des variations de l'aimantation d'une pyrrhotine normale et de deux pyrrhotines anormales.

La première (*fig.* 3) ressemble beaucoup aux courbes analogues

trouvées par M. P. Curie [1] pour le fer. L'intensité d'aimantation baisse régulièrement, lentement d'abord, puis de plus en plus vite, pour aboutir à une disparition très rapide du ferromagnétisme à 348°. Le phénomène qu'elle représente est réversible.

Les courbes, *fig.* 6, sont plus compliquées. Dans chacune d'elles la branche descendante est nettement différente de la branche ascendante. Elles présentent l'une et l'autre un minimum et un maximum, et forment ensemble une boucle d'hystérèse thermique.

Il était naturel de supposer que ces phénomènes complexes fussent en relation avec le groupement des trois cristaux dans le plan magnétique; aussi, séparant à partir d'ici l'étude des pyrrhotines normales et anormales, avons-nous abordé les unes et les autres par l'analyse du groupement cristallin à diverses températures.

DESCRIPTION DE L'APPAREIL.

L'appareil plus complet, nécessaire pour l'analyse du groupement cristallin dans le plan magnétique, est représenté dans la *fig.* 1.

Un électro-aimant E, qui possède des noyaux cylindriques de 5 centimètres de diamètre, donne, dans un entrefer de $2^{cm},5$, un champ atteignant 5200 gauss pour un courant magnétisant de 6 ampères environ dans l'enroulement formé de fil de $1^{mm},5$. Il est placé sur une plate-forme tournante de bronze B qui permet de donner au champ tous les azimuts par rapport à la substance. Ces azimuts sont lus sur une graduation tracée sur le bord cylindrique de la plate-forme. L'entrefer de l'aimant se trouve exactement dans l'axe de la plate-forme; il contient l'appareil de chauffage.

Celui-ci, un four électrique, est formé d'un fil de platine de $0^{mm},3$ de diamètre et de $1^{m},50$ de longueur, enroulé bifilairement sur un tube de verre *v* de 20 centimètres de longueur et de $1^{cm},5$ de diamètre. Le fil est fixé sur le tube au moyen d'une pâte formée de silicate soluble et d'amiante, et déposée suivant deux lignes verticales. Il est isolé de l'aimant et protégé contre les pertes de chaleur par du carton d'amiante. Le courant, de 2 ampères au maximum, y est amené par le godet et la gouttière *gg* contenant du mercure et

[1] P. Curie, *Ann. Chim. Phys.*, 7e série, t. V, p. 289; 1895.

placés dans l'axe. Les températures, jusqu'à 400°, pouvaient facilement être maintenues constantes à un demi-degré près.

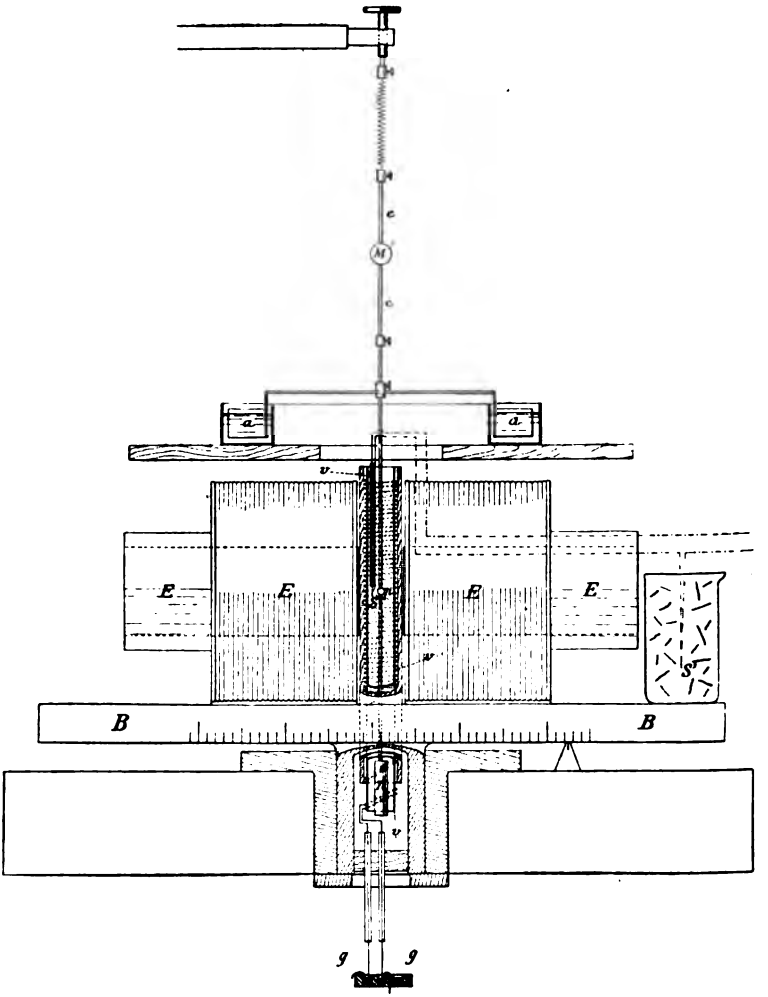


Fig. 1.

Elles étaient données par un couple platine-platine rhodié dont l'une des soudures S était placée dans le voisinage immédiat de la substance et l'autre S' plongée dans un verre contenant de la glace fondante, posé sur la plate-forme. Un cordon souple relie le couple à

un galvanomètre à miroir. Ce couple a été étalonné par la mesure de la force électromotrice, dont la valeur est connue en fonction de la température, et contrôlée à plusieurs reprises au moyen d'un thermomètre normal.

La substance p est fixée à une tige de cuivre portant un poids tenseur π et un amortissement à ailettes a. Cette tige de cuivre est isolée thermiquement du ressort en hélice qui la porte par une tige d'ébonite e sur laquelle se trouve le miroir M.

Pour déterminer au moyen de cet appareil l'intensité d'aimantation en valeur absolue [1], il suffit de déterminer, outre le champ, la déviation et l'angle α, le volume de la substance et la constante de torsion du ressort. Le volume est déterminé par la méthode du flacon et vérifié en mesurant la densité sur un fragment plus grand et en pesant l'échantillon. La constante de torsion se déduit de la durée d'oscillation avec et sans une surcharge de moment d'inertie connu.

PYRRHOTINES NORMALES.

Analyse du groupement cristallin dans le plan magnétique. — Lorsque le plan magnétique de la substance fixée à l'équipage mobile de l'appareil est horizontal, on obtient, en faisant tourner la plate-forme de 10° en 10°, et dans les régions de variations rapides de degré en degré, le couple exercé sur la substance pour les différents azimuts du champ dans le plan magnétique. Dans la *fig.* 2, on a réuni les courbes représentant le résultat de ces mesures aux températures de 20°, 101°, 202°,7, 283°, 308°, 327°, dans un champ de 1500 gauss. Les observations à 20° ont été reprises après le retour à la température ordinaire, et les points ainsi obtenus ont été marqués par ⊙. Ils sont très voisins de la première courbe.

Il a été expliqué ailleurs comment chacune des trois variations brusques de ces couples, qui se rencontrent à 60° les unes des autres, décèle l'existence d'un des trois cristaux élémentaires associés dans le plan magnétique et permet d'apprécier leur importance relative. Le résultat a été pour l'échantillon auquel se rapportent les courbes de la *fig.* 2, avant l'échauffement :

Première direction	Deuxième direction	Troisième direction
100	14,6	21,9

[1] Voir p. 374.

et après l'échauffement et l'action simultanée du champ :

100	14,7	21,75

Ces deux résultats concordent au degré de précision des expériences.

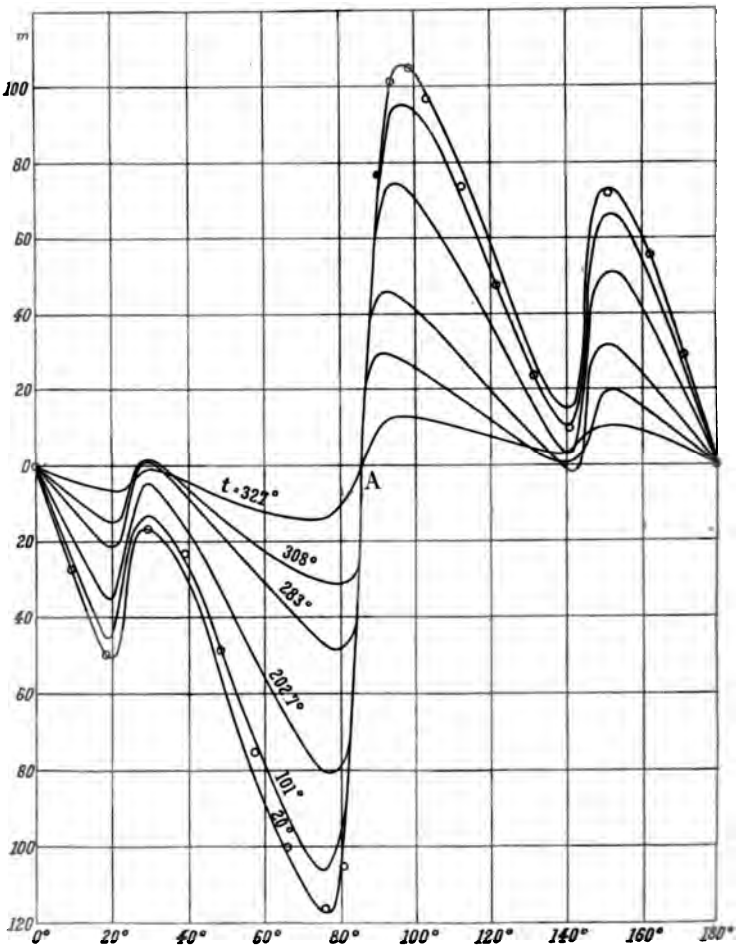


Fig. 2.

Cette constance du groupement a été constatée sur de nombreux échantillons de cette espèce ; elle s'observe aussi bien lorsque le champ qui agit pendant l'échauffement jusqu'aux températures supérieures à 350° atteint 4000 gauss.

Lorsque l'on a affaire à une substance cristallographiquement simple, le coefficient angulaire des courbes (*fig.* 2), représentant les couples C en fonction des azimuts α, prend une signification simple dans les régions voisines du maximum et du minimum d'aimantation [1]; au minimum, on a :

$$\frac{\Delta C}{\Delta \alpha} = \frac{H^2}{n} \frac{1}{1 + \frac{n}{N}},$$

tant que la saturation n'est pas atteinte. n est la valeur réciproque de la susceptibilité de la substance supposée rendue isotrope par la défalcation du champ démagnétisant d'origine cristalline, et N le coefficient démagnétisant dans la direction de difficile aimantation, provenant de la structure cristalline.

Cette formule donne le moyen de contrôler l'hypothèse qui attribue la valeur finie de la susceptibilité dans la direction de facile aimantation, qui est égale à $\frac{1}{n}$, à la structure grossière (porosité, cassures). Cette structure, on le sait, joue un rôle démagnétisant analogue à celui des dimensions finies de l'échantillon, et, au point de vue expérimental, ces deux effets s'ajoutent. Puisque n est beaucoup plus petit que N [2], la formule ci-dessus se réduit à

$$\frac{\Delta C}{\Delta \alpha} = \frac{H^2}{n},$$

et, si H est constant, le coefficient angulaire des courbes au minimum sera le même, tant que la forme et la structure ne changeront pas d'une manière appréciable. Si l'élévation de température ne modifie pas la structure, il doit rester constant quand la température varie. Or, grâce à sa rapidité, le phénomène au minimum est peu influencé par la superposition des phénomènes plus lents provenant des deux cristaux parasites, et le caractère $\frac{\Delta C}{\Delta \alpha} = C^{te}$ doit se retrouver sur les courbes expérimentales, ce qui a lieu en effet d'une manière frappante en A (*fig.* 2). La courbe correspondant à 327° seule fait exception. A cette température la formule donnée ci-dessus pour $\frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$ n'est plus valable. Le champ démagnétisant est en effet, à cette tem-

---

(1) Voir p. 363.
(2) Voir p. 361 et suiv.

pérature, assez faible pour que l'aimantation décrive le cercle de saturation en entier, comme nous nous en rendrons compte plus loin.

Le coefficient angulaire au maximum a pour expression :

$$\frac{\Delta C}{\Delta \alpha} = NI_M^2 \frac{H}{H + NI_M}.$$

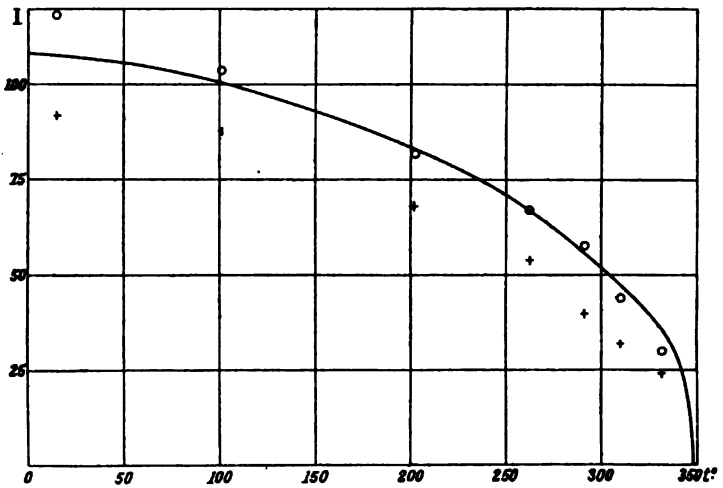


Fig. 3.

Ici encore on peut faire sur les courbes (*fig.* 3) une détermination approchée en valeurs relatives de $\frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$ en fonction de la température.

En effet, pour une matière simple, la région de la courbe des couples comprise entre les variations brusques est presque rectiligne dans une grande étendue. Le résultat de la superposition de ces régions relatives aux trois cristaux constituants donnera donc encore une portion sensiblement rectiligne de coefficient angulaire proportionnel à celui de la substance simple. Or, si le champ démagnétisant maximum NI_M de la structure cristalline est dû à l'action mutuelle de petits aimants élémentaires, il doit être proportionnel à I_M, et N est une constante; $\frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$ doit donc, vers la température de disparition du magnétisme, tendre vers zéro comme I_M^2.

Nous avons déterminé approximativement sur les courbes (*fig.* 3)

les valeurs de $\frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$ contenues dans le tableau suivant. Les valeurs de I_M, en fonction de la température, sont empruntées à des expériences décrites dans la suite de ce travail.

t	I_M	$\frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$	$\frac{1}{I_M^2} \frac{\Delta C}{\Delta \alpha}$
20	107	40,2	$3,5 \times 10^{-3}$
101	100	34,6	3,5
202,7	83	28,4	4,0
283	59	16,2	4,6
308	47,5	11,1	4,9
327	38,5	6,6	4,5

La dernière colonne semble donner une indication conforme à la constance de N. Mais les valeurs de I_M ne descendent pas assez bas pour que l'on en puisse tirer une conclusion certaine. Les expériences étaient faites avant que nous ayons aperçu qu'elles pouvaient servir à trancher cette question de physique moléculaire. Aussi est-ce plutôt pour indiquer comment le problème est abordable que nous relatons cette tentative.

L'intensité à saturation en fonction de la température. — Il serait particulièrement intéressant de connaître les variations thermiques de l'intensité d'aimantation à saturation, puisque, dans les théories moléculaires, cette quantité est proportionnelle au moment magnétique de la molécule. Cette quantité n'est pas directement abordable à l'expérience dans les substances à groupements cristallins complexes, pour lesquels elle ne s'obtiendrait que dans un champ infini. On doit donc se contenter des approximations obtenues en mesurant l'intensité d'aimantation de la substance dans des champs élevés.

La *fig.* 3 donne les variations de cette intensité d'aimantation observée dans un champ de 2000 gauss, relevée sur la substance étudiée ci-dessus dans le plan magnétique. La partie de cette courbe voisine du point de chute rapide du ferromagnétisme à 348° n'est pas éloignée d'une parabole dont l'axe coïnciderait avec l'axe des températures et dont le sommet serait à 348°. Il n'est pas impossible qu'après cette chute rapide il y ait encore une décroissance lente d'un résidu de ferromagnétisme, comme M. Curie [1] l'a trouvé pour le fer. Une étude spéciale du voisinage du point de disparition du magnétisme n'a pas été faite.

[1] P. Curie, *loc. cit.*

Les courbes *fig.* 4 et 5 ont une signification analogue; seulement,

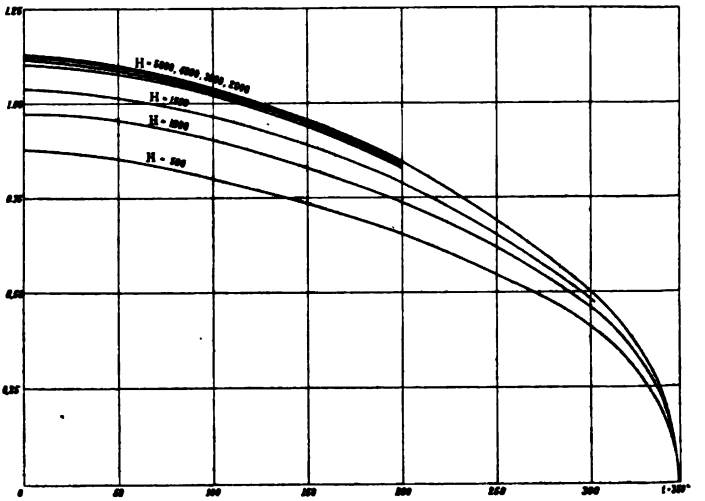


Fig. 4.

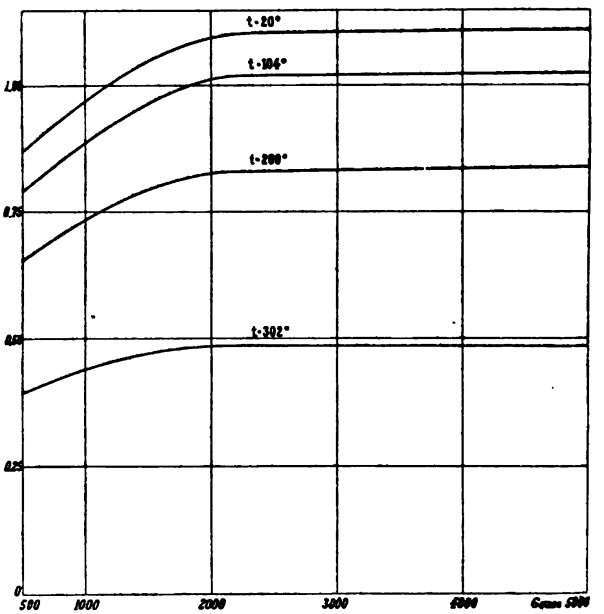


Fig. 5.

au lieu d'opérer avec un champ constant, on a pour plusieurs tempéra-

tures fait varier le champ de 500 à 5000 gauss. La proximité de la courbe de 4000 et de 5000 gauss dans la *fig.* 4 montre que cette dernière doit déjà donner une bonne image de la saturation. La *fig.* 5 montre par la constance de la saturation apparente que la propriété du plan magnétique est aussi approchée à ces températures qu'à la température ordinaire. Ces courbes renferment les données du tableau suivant, dans lequel l'aimantation est exprimée avec une unité arbitraire.

H	Intensité d'aimantation pour :			
	$t = 20°$	$t = 104°$	$t = 200°$	$t = 303°,5$
500 gauss	0,87	0,794	0,656	0,393
1000	0,967	0,901	0,736	0,4425
1500	—	0,961	0,784	0,459
2000	1,095	1,014	0,826	0,487
3000	1,107	1,022	0,835	0,487
4000	1,114	1,024	0,843	0,485
5020	1,118	1,024	0,846	0,485

L'Hystérèse.

a) *Hystérèse alternative.* — Tous les procédés qui permettent de relever une courbe d'aimantation rapportée à une direction déterminée, c'est-à-dire une courbe d'aimantation au sens usuel du mot, sont en même temps des procédés de détermination de l'hystérèse alternative. Or la méthode expérimentale que nous avons rappelée à la première page de ce travail donne cette courbe d'aimantation (1), et par conséquent les phénomènes d'hystérèse alternative, pour la direction disposée horizontalement dans le plan magnétique qui est vertical. Si cette direction est celle de facile aimantation, on sait, par l'étude qui en a été faite à la température ordinaire (2), que le cycle d'hystérèse se réduit à un rectangle dont les côtés sont parallèles aux axes et dont la hauteur est le double de l'intensité d'aimantation à saturation I_M, et la largeur le double champ coercitif H_C.

Il n'est pas nécessaire de tracer cette courbe d'aimantation. Le travail d'hystérèse par cycle E peut, on le sait, être déduit directement de la courbe des couples relevée à l'aller et au retour (3).

Quant à la détermination du champ coercitif, remarquons qu'au

(1) Voir p. 373.
(2) Voir p. 376.
(3) Voir p. 380.

moment où l'aimantation s'annule, le couple exercé sur la substance s'annule également. Le point d'intersection de la courbe des couples avec l'axe des azimuts correspond donc à l'aimantation nulle. Supposons que ce point d'intersection soit distant de la perpendiculaire au plan magnétique d'un angle α_C. La composante du champ dans le plan magnétique, c'est-à-dire le champ coercitif, sera :

$$H_C = H_C \sin \alpha_C.$$

Le champ coercitif est donc sensiblement proportionnel à α_C. Or $2\alpha_C$, l'écart des points d'intersection de la courbe d'aller et de celle de retour, se mesure sur les courbes.

Le résultat de ces déterminations, faites dans un champ de 900 gauss sur la substance à laquelle se rapportent aussi les courbes (*fig.* 2), est contenu dans le tableau suivant aux colonnes E et $2\alpha_C$.

t	I unité arbitraire	E unité arbitraire	$2\alpha_C$	$\frac{\sqrt{E}}{I}$	$\frac{2\alpha_C}{I}$
15°	107,5	140,5	4°,6	1,1	0,43
101	110,2	107,2	4°,4	1,03	0,44
201,4	83,0	67,0	3°,4	0,98	0,40
262,4	66,7	44,0	2°,7	1,00	0,40
291,3	55	33,3	2°,0	1,04	0,36
310	47	19,5	1°,6	0,94	0,34
331,5	35	9	1°,2	0,86	0,34

Si les lois de l'hystérèse développées ailleurs par l'un de nous [1] sont exactes, le travail d'hystérèse alternative par cycle doit être égal à :

$$4 I_M \cdot H_C.$$

Or I_M représente l'intensité d'aimantation à saturation et H_C le champ coercitif. Et si le champ coercitif est dû à l'action mutuelle de petits aimants élémentaires, il doit, lui aussi, être proportionnel à l'intensité I_M.

Mieux que par les nombres des deux dernières colonnes, on se rend compte de cette vérification par la *fig.* 3, qui contient, outre les valeurs de I_M représentées par la courbe, les valeurs de $\sqrt{E}$ représentées par $\odot$, et celles de $2\alpha_C$ représentées par $+$.

b) *Hystérèse par rotation du champ dans le plan magnétique.* — Nous avons déterminé sur le même échantillon, par la même méthode des couples, le travail E dépensé par hystérèse quand un champ

---

[1] Voir p. 375 et suiv.

constant de 1500 gauss tourne dans le plan magnétique, et nous avons trouvé, en une unité arbitraire :

t	E
20°	148
64,5	129
104,2	107
151	81
204,3	48
221	41
249	23
283	8

Cette énergie d'hystérèse décroît presque linéairement en fonction de la température. Par une petite extrapolation, on trouve qu'elle s'annulerait à 297°, c'est-à-dire à une température inférieure à celle de la disparition du ferromagnétisme et de l'hystérèse alternative. Ce fait, à première vue paradoxal, s'explique si on le rapproche de la nullité, découverte par ailleurs, de l'hystérèse le long du cercle de saturation.

Si en effet, comme cela est suggéré par l'hypothèse moléculaire, qui attribue les phénomènes ferromagnétiques à l'action mutuelle de petits aimants élémentaires, et rendu probable par les résultats expérimentaux (p. 401), le coefficient démagnétisant N, dû à la structure cristalline, est constant, il faut que le champ démagnétisant maximum NI_M décroisse proportionnellement à I_M. Si, à 297°, il devient inférieur au champ extérieur, l'aimantation décrira, pour toutes les températures supérieures à celles-là, le cercle de saturation tout entier et l'hystérèse sera nulle.

PYRRHOTINES ANORMALES.

L'irréversibilité thermique est très inégalement accentuée dans les substances anormales de diverses origines. La courbe I (*fig.* 6) représente la variation du couple exercé par un champ constant en fonction des températures ascendantes et descendantes, pour un échantillon de New-Jersey. Certaines pyrrhotines feuilletées de Morro Velho ont présenté des boucles d'hystérèse thermique encore plus ouvertes ; celles de Bodenmais ont au contraire une boucle d'hystérèse peu accentuée, dans le genre de celle de la courbe II de la *fig.* 6.

Dans la *fig.* 6, le couple ne revient pas à la valeur initiale au

retour à la température ordinaire après le chauffage dans le champ magnétique. Par le premier chauffage, ce couple augmente souvent beaucoup. Nous avons observé, dans certaines pyrrhotines de New-Jersey, une amplification de ce couple dans le rapport de 1 à 3, dans certaines pyrrhotines de Morro Velho dans le rapport de 1 à 4,5. Dans certaines pyrrhotines de Bodenmais, cette amplification était nulle, et dans d'autres elle atteignait le rapport 1 à 3. Dans les chauffages suivants il se produisait, entre le couple initial et le couple final, des variations capricieuses tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

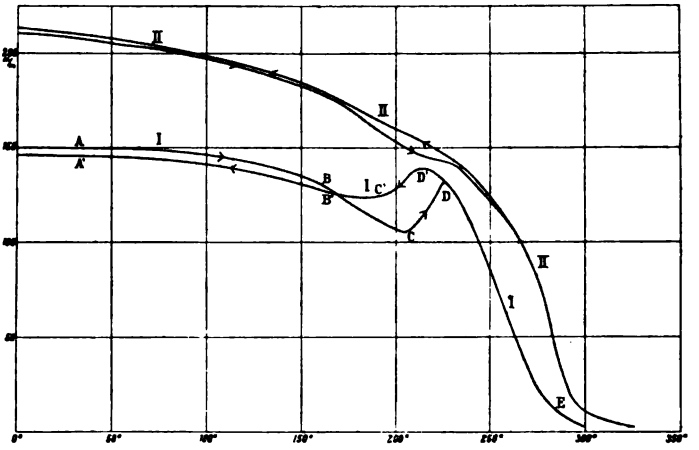


Fig. 6.

Si nous considérons la courbe typique *fig.* 6, I, nous observons jusqu'à 160° une décroissance lente AB des propriétés magnétiques, qui ne distingue pas ces substances des substances normales, puis plus rapide (BC) jusqu'à 208°. Ensuite, de C en D, la courbe se relève jusqu'à 228° pour redescendre ensuite (DE) à zéro vers 300°. Cette dernière partie de la courbe est réversible. Elle est tangente à l'axe des températures. La détermination exacte du point de perte du ferromagnétisme échappe donc à cette méthode. Mais, jusqu'à preuve du contraire, on peut considérer comme probable qu'il est à 348° comme pour les substances normales. A partir de D, la courbe des températures descendantes quitte la courbe des températures ascendantes; il se produit un retard thermique dans l'apparition du maximum D′ et du minimum C′ par rapport aux points analogues de

la première courbe, puis la courbe B'A', correspondant au retour aux basses températures, est sensiblement parallèle à AB. Souvent cette courbe de retour est placée au-dessous de AB, comme dans le cas de la figure, souvent aussi au-dessus, et ce n'est qu'exceptionnellement qu'elle coïncide avec elle. Pour cette substance, quels qu'aient été les couples au retour aux basses températures, ils retrouvent toujours les mêmes valeurs quand on atteint de nouveau les températures correspondant à C et D.

Les courbes (*fig.* 6, I et II) ont été relevées dans un champ de 2000 unités. Quand on change la valeur du champ, les courbes sont déformées sans changer notablement de caractère, et les températures du minimum C et du maximum D restent les mêmes. Une élévation de température qui ne dépasse pas 170° ne fait apparaître aucun phénomène irréversible; mais, dès qu'elle devient supérieure à 208°, la boucle d'hystérèse thermique commence à se dessiner au retour vers les températures plus basses, et elle atteint son plein développement quand le point D a été dépassé.

Pour ces substances, dès la température ordinaire, le critère du plan magnétique par la saturation apparente constante est en défaut. On a observé par exemple :

H gauss	I unité arbitraire
1986	3,52
3930	3,60
7300	3,56
9150	3,54
10195	3,52
11140	3,50

Il y a donc dans ces observations brutes, c'est-à-dire sur lesquelles la correction les ramenant à ce que donnerait une substance cristallographiquement simple n'a pas été faite, une décroissance de l'aimantation apparente de 3 0/0. Jamais une décroissance aussi forte n'a été observée dans ces conditions sur une substance normale. Les expériences d'induction faites antérieurement par l'un de nous ont aussi montré que, pour les substances feuilletées, la propriété du plan magnétique est moins approchée que pour les substances normales.

Mais, à la température ordinaire, le plan de base du prisme orthorhombique de la pyrrhotine est encore de beaucoup un plan d'aimantation maxima, tandis qu'au-dessus de 228° la saturation apparente baisse à tel point dans les champs croissants que l'aimantation

perpendiculaire à ce plan ne peut être que du même ordre de grandeur que celle dans ce plan. La substance s'achemine en même temps vers l'état non magnétique et une moins grande anisotropie. Ce fait trouve aussi son expression en ce que, aux températures qui précèdent la disparition du ferromagnétisme, la courbe représentant l'aimantation apparente est beaucoup plus basse que pour les substances normales.

Analyse du groupement cristallin. — Les courbes des couples exercés sur la substance, en fonction de l'azimut du champ dans le

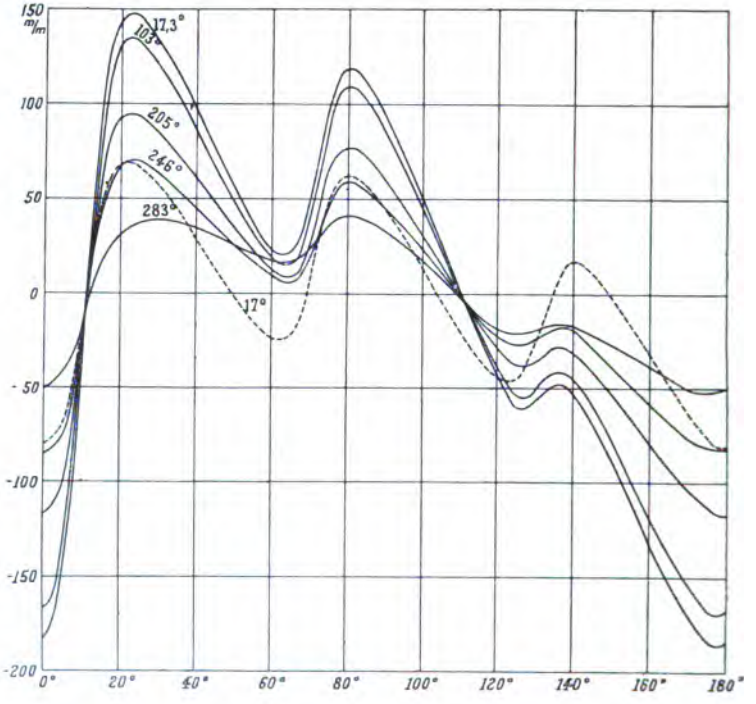


Fig. 7.

plan magnétique, révèlent, comme pour les substances normales, l'existence de trois cristaux élémentaires associés à 120° l'un de l'autre. Les variations rapides du couple qui correspondent au passage du champ par le minimum de l'une des composantes sont, à la vérité, un peu moins brusques que dans les substances normales ;

mais, l'expérience acquise avec ces dernières aidant, on évalue facilement l'importance relative des composantes.

La *fig.* 7 renferme ces courbes relevées à diverses températures pour une substance de New-Jersey. Les courbes en traits pleins sont prises aux températures croissantes, la courbe pointillée après le retour à la température ambiante.

La composition initiale est représentée par :

66,3 25,6 8,1 0/0

et après l'échauffement, pendant lequel un champ de l'ordre de 2000 gauss a agi dans diverses directions, elle est devenue :

46,9 29,4 23,7 0/0

Il semble donc que la matière qui constitue le cristal soit susceptible de passer, sous l'influence combinée du champ et de l'élévation de température, de l'une à l'autre des trois composantes du groupement.

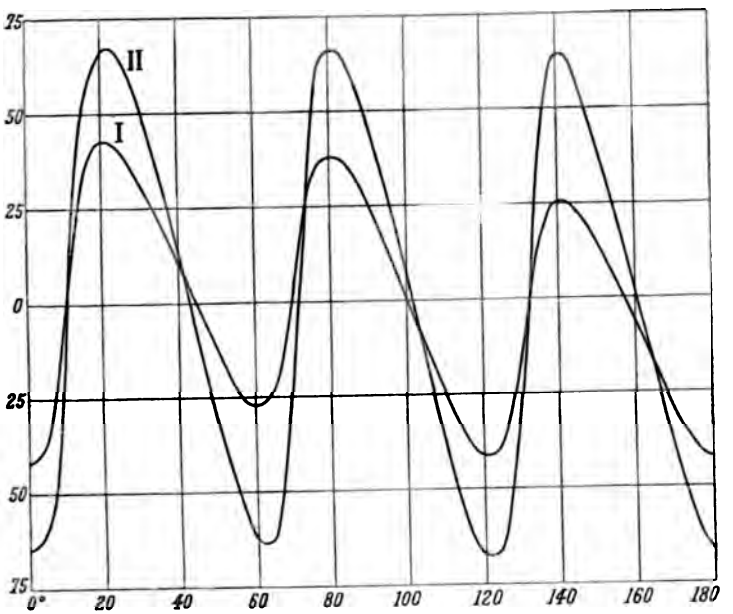


Fig. 8.

Lorsque le cristal est chauffé en l'absence du champ, il en résulte

une répartition sensiblement égale entre les trois composantes qui est indiquée par la courbe I de la *fig.* 8.

On obtient aussi la même répartition uniforme en faisant tourner le champ pendant le refroidissement. La courbe II (*fig.* 8) est obtenue de cette façon.

Ces déplacements mettent-ils un certain temps à se produire? Un cristal dans lequel les trois composantes étaient très différentes les unes des autres fut chauffé à 290° en l'absence du champ et refroidi. Il en résulta une certaine répartition de la matière entre les trois composantes. Cette répartition ne changea pas lorsque, la température étant de nouveau portée à 290°, on fit agir pendant deux secondes un champ de 4800 gauss. Par contre, une action du même champ, à la même température, pendant quatre minutes, produisit une altération profonde du groupement, qui ne put être augmentée sensiblement par une action de plus longue durée.

L'hystérèse dans le plan magnétique donne un deuxième critérium pour apprécier la répartition des trois composantes du groupement cristallin. La différence entre les ordonnées de la courbe des couples à l'aller et au retour possède un maximum très accentué dans la direction de difficile aimantation de chaque cristal. La *fig.* 9 représente ces différences en fonction des azimuts du champ. La courbe en traits pleins a été relevée avant les expériences représentées dans la *fig.* 7, la courbe pointillée après ces expériences, et toutes deux à la température ordinaire.

On voit que dans la première les maxima de ces couples d'hystérèse sont sensiblement proportionnels à la valeur initiale des trois composantes ; dans la deuxième, ces maxima d'hystérèse sont beaucoup plus voisins de l'égalité.

L'énergie d'hystérèse dans le plan magnétique décroît d'abord, comme pour les substances normales, à peu près linéairement jusque vers 280°, puis elle s'écarte de la loi linéaire, décroissant beaucoup plus vite. Aux températures descendantes, jusque vers 200° environ, l'énergie d'hystérèse est plus faible qu'aux températures ascendantes ; au-dessous, par contre, elle lui est supérieure.

Tandis que, dans les pyrrhotines normales, tous les phénomènes, y compris l'hystérèse, sont *thermiquement* réversibles, et que nous n'avons rien trouvé qui ressemblât à la trempe ou au recuit, dans les pyrrhotines anormales un refroidissement rapide ou lent modifie aussi bien la courbe des couples moyens que celle des couples d'hys-

térèse, comme il résulte des *fig.* 10 et 11, qui se rapportent à la même substance de New-Jersey.

Comme dans l'acier, un refroidissement rapide conduit à une augmentation de l'hystérèse.

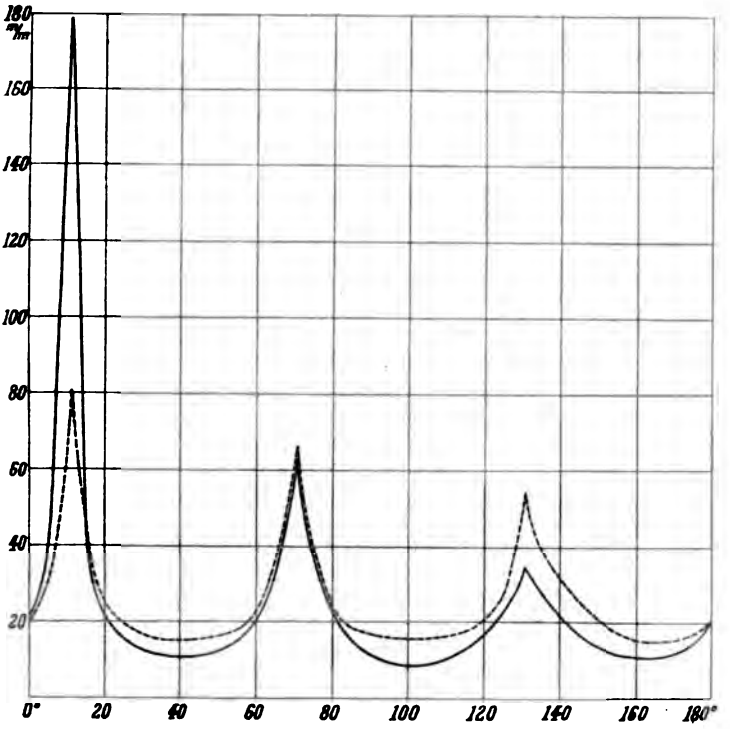
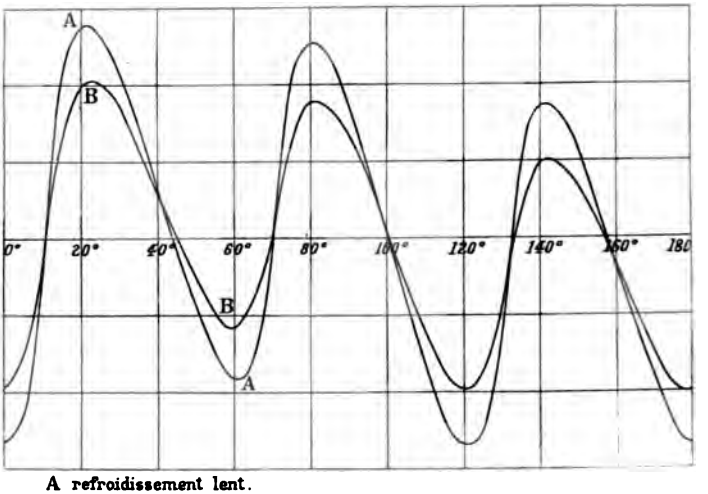


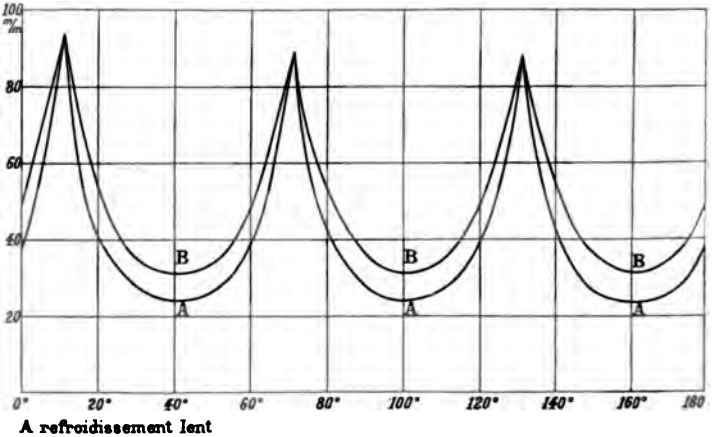
Fig. 9.

Influence de la direction du champ. — Si, partant de l'état de répartition uniforme des trois composantes, on chauffe le cristal à 350° et qu'on le laisse refroidir sous l'influence d'un champ de 500 gauss agissant dans la direction d'un maximum d'aimantation, ce maximum prend une valeur prédominante et les deux autres prennent des valeurs moindres égales. Si l'on fait agir de même des champs de plus en plus intenses jusqu'à 5000 gauss, la prédominance de la composante coïncidant avec le champ devient de plus en plus grande. Les amplitudes des composantes latérales (*fig.* 12, courbe 1) sont inférieures à 50 0/0 de la composante favorisée. Avec l'appareil employé, les champs ne pouvaient dépasser 5000 gauss, et il n'est



A refroidissement lent.
B " rapide.

Fig. 10.



A refroidissement lent
B " rapide.

Fig. 11.

pas possible de dire si l'action dirigeante du champ tend vers une limite. Entre 500 et 5000 gauss elle croît d'une manière continue. En répétant plusieurs fois cet échauffement combiné à l'action du champ, on n'altère pas le résultat.

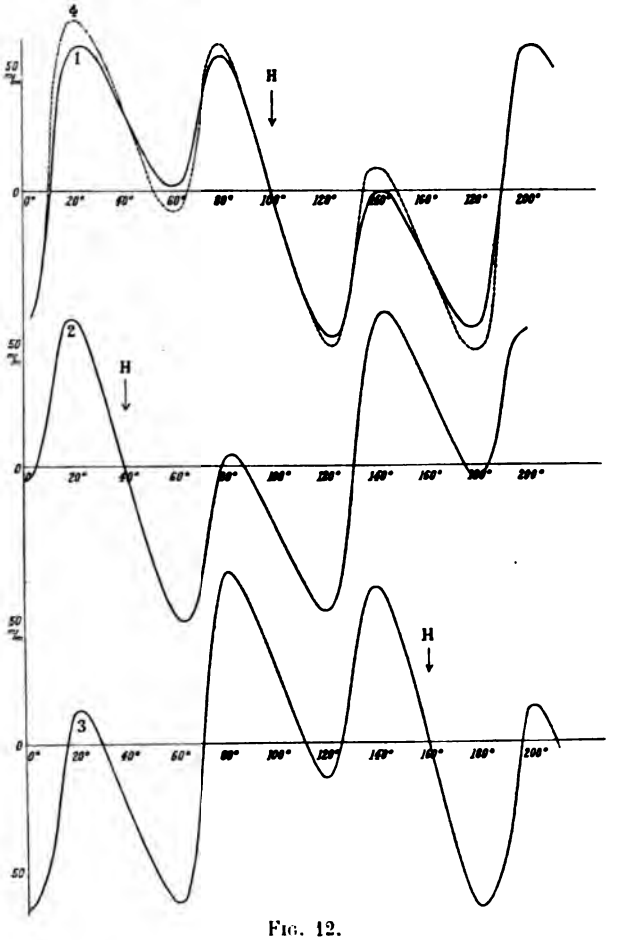


Fig. 12.

La prochaine question qui se posait était celle de l'équivalence de trois directions à 120° l'une de l'autre, vis-à-vis de celle du champ.

Nous avons répété l'expérience ci-dessus en faisant agir le champ successivement suivant les maxima orientés dans les azimuts :

100° 160° 40° 100°

Les résultats de ces opérations sont représentés par les courbes 1, 2, 3, 4 de la *fig.* 12.

Pour chacune de ces orientations du champ, la composante dont le maximum coïncide avec le champ prédomine, et les deux autres composantes prennent des valeurs égales entre elles et à 50 0/0 environ de l'amplitude principale. Les deux courbes prises sous l'azimut 100° au début et à la fin de la série ne se distinguent que par une légère croissance de la profondeur des entailles.

Corrélativement, le maximum d'hystérèse se déplace et prédomine au minimum placé à 90° de la direction d'action du champ.

Les trois maxima ont donc joué dans cette expérience des rôles équivalents. Cette équivalence ressort aussi de la courbe II (*fig.* 8), résultat du refroidissement dans le champ de l'aimant, auquel on imprimait à la main une rotation aussi régulière que possible. On a obtenu des résultats d'une interprétation analogue en faisant agir le champ successivement suivant la direction des trois minima pendant le refroidissement.

Les expériences décrites jusqu'à présent dans cette deuxième partie se rapportent aux pyrrhotines de New-Jersey. Les mêmes anomalies se rencontrent à un degré beaucoup plus marqué dans les pyrrhotines feuilletées de Morro Velho dont il nous reste à parler. Tandis que, dans les précédentes, la variabilité de la distribution des éléments ne se manifeste d'une manière marquée qu'à partir de 280°, dans ces dernières elle commence à être sensible à 208° et est déjà très forte à 235°.

En laissant refroidir un échantillon de cette substance en l'absence du champ, on obtient une courbe indiquant une répartition visiblement inégale des trois composantes, et par le refroidissement dans le champ tournant nous avons retrouvé *la même* répartition inégale.

En faisant agir le champ successivement dans la direction des trois maxima, on obtient des courbes qui ont une parenté évidente, mais ne sont pas superposables par un déplacement de 60° ou de 120°, comme pour la pyrrhotine anormale de New-Jersey.

Si donc on admet que, par suite d'une certaine mobilité, la matière passe d'un cristal élémentaire à l'autre, on doit supposer, au moins pour les champs dont nous nous sommes servis, que cette mobilité est limitée. Dans l'échantillon de New-Jersey, la mobilité ne s'étendrait qu'à 1/4 environ de la matière, et la partie fixe serait répartie également entre les trois composantes. Dans celui de Morro Velho, la

partie mobile serait un peu plus grande, mais la partie fixe serait répartie inégalement entre les trois composantes.

Les résultats expérimentaux concernant l'une et l'autre substance peuvent facilement être raccordés avec l'hypothèse différente à laquelle la discussion suivante nous conduira à donner la préférence et avec les nouvelles expériences que cette discussion nous conduira à ajouter.

DISCUSSION DES PROPRIÉTÉS DES PYRRHOTINES ANORMALES.

Le langage dont nous nous sommes servis jusqu'à présent pour la description des faits implique l'hypothèse de la mobilité de la matière, passant d'un cristal élémentaire à l'autre du groupement cristallin. Cette hypothèse est-elle nécessaire? Est-elle la seule possible? C'est ce que nous nous proposons d'examiner.

Pour les substances normales, on démontre facilement que la valeur du couple exercé par le champ sur la substance est, pour l'unité de volume :

$$C = N \cdot I_x \cdot I_y,$$

où N est le coefficient démagnétisant caractéristique de la substance, I_x la composante de l'aimantation dans la direction de facile aimantation et I_y la composante de l'aimantation dans la direction de difficile aimantation. Ce couple a un maximum égal à :

$$\frac{NI_M^2}{2},$$

où I_M est l'intensité d'aimantation à saturation. C'est ce couple maximum que représente la moitié de l'amplitude de la variation brusque du couple pour l'unité de volume de la substance. Pour une substance normale, une variation dans cette amplitude conduirait donc à admettre :

1° Ou une variation dans la quantité de matière présente dans le cristal élémentaire considéré ;

2° Ou une variation de N, c'est-à-dire du régime démagnétisant imposé à la matière par la structure cristalline ;

3° Ou une variation de l'intensité d'aimantation à saturation.

Pour les substances anormales, il n'existe plus de coefficient démagnétisant constant N ; mais l'allure générale des phénomènes est la

même, et les variations d'amplitude peuvent encore être dues à l'une des trois causes que nous venons d'indiquer.

Si l'on suppose qu'à une température déterminée la matière est toujours dans le même état magnétique, la première de ces causes peut seule entrer en considération.

Mais les expériences sur la loi de l'aimantation en fonction de la température qui ont mis en évidence une boucle d'hystérèse thermique nous ont appris l'existence, à la même température, de différents états magnétiques à des titres différents. Les causes de variation 2° et 3° peuvent donc intervenir. La comparaison de deux courbes de la *fig.* 8 qui indiquent toutes deux une répartition uniforme entre les trois composantes, *mais où celle qui a été obtenue par le refroidissement dans un champ tournant possède des amplitudes à peu près doubles de celle qui a été obtenue dans le refroidissement en l'absence du champ*, montre que l'une au moins des causes 2° et 3° intervient certainement.

Une nouvelle manière d'envisager les phénomènes se présente alors à l'esprit : est-ce que cette mobilité de la matière d'un cristal élémentaire à l'autre ne serait qu'une apparence et la conséquence des variations indépendantes de l'état magnétique des composantes du cristal ? Cette question serait tranchée immédiatement si l'on possédait un cristal simple. S'il n'était pas possible de faire naître les deux autres composantes par l'action combinée du champ et de l'élévation de température, on devrait conclure que la mobilité n'existe pas.

Nous avons soumis à l'expérience le petit fragment de New-Jersey qui se rapprochait le plus de la simplicité parmi ceux que nous possédions et dont la composition est représentée par :

100 : 4,75 : 3,1.

La courbe I de la *fig.* 13 se rapporte à cet échantillon dans son état initial, la courbe II a été obtenue par le refroidissement à partir de 345° en l'absence du champ, la courbe III par le refroidissement pendant l'action d'un champ tournant de 8100 gauss. Le refroidissement durait trois quarts d'heure environ. Les courbes représentées dans la figure ont été relevées dans un champ de 3400 gauss.

On voit que, par l'un ou l'autre de ces traitements, les amplitudes qui caractérisent les trois composantes ont varié. La plus grande am-

plitude a diminué, les petites ont augmenté. Ces dernières, qui, dans la courbe primitive I, ne se traduisaient que par l'existence de points d'inflexion dans les directions (2) et (3), apparaissent nettement. Si, variant l'expérience, on fait agir le champ dans la direction d'un maximum pendant le refroidissement, la variation brusque corres-

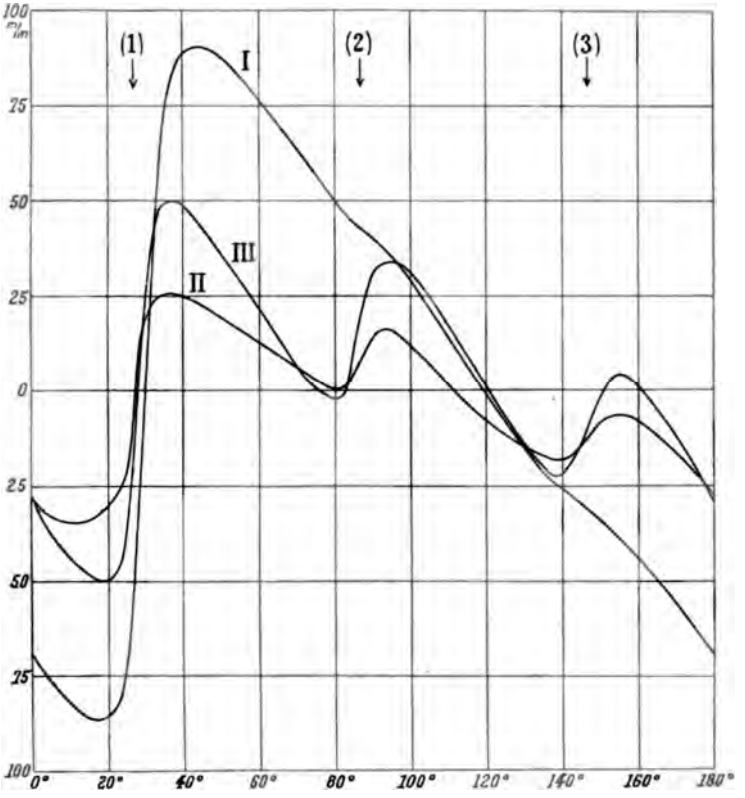


Fig. 13.

pondante prend à peu près la même importance que dans le champ tournant, les deux autres restant intermédiaires entre ce qu'elles seraient en l'absence du champ et dans le champ tournant. De toutes ces expériences il résulte que la mobilité réelle ou apparente de la matière d'un cristal élémentaire à l'autre est moindre pour ce cristal plus voisin de la simplicité cristallographique. Il n'est donc pas téméraire d'admettre que cette mobilité s'annulerait tout à fait pour un cristal simple.

En outre, il est remarquable que, malgré la différence des deux traitements, le rapport des trois amplitudes dans les courbes II et III est sensiblement le même et voisin de 1 : 2. Quand le mode opératoire est équivalent pour les trois directions, on trouve donc le même rapport entre les trois amplitudes, quel que soit ce mode opératoire. La constance de ce rapport contribue à rendre très vraisemblable la constance du groupement cristallin et l'explication des déplacements apparents par les changements d'état de chacune des composantes. C'est cette explication que nous croyons devoir adopter. Aucun fait n'est en contradiction avec elle, mais nous signalerons deux circonstances des phénomènes qui, à première vue, nous paraissaient favorables à l'hypothèse contraire. Premièrement il faut admettre que, dans l'échantillon *à l'état naturel, les trois composantes sont dans des états magnétiques différents*, et en particulier, relativement aux deux échantillons pour lesquels nous avons reproduit les courbes, que l'infériorité des plus petites composantes n'était qu'apparente dans le premier; dans le deuxième échantillon, par contre, la différence des trois composantes était réelle, mais elle était exagérée par l'état relativement moins magnétique des petites composantes.

Ensuite, les phénomènes d'hystérèse donnent un deuxième procédé d'analyse du groupement cristallin, peut-être un peu moins sensible que celui que nous avons employé. Nous avons vu, page 410, que les résultats de ce deuxième procédé concordent avec ceux du premier. Il faut donc imaginer que, dans les changements d'état magnétique, les phénomènes d'hystérèse varient parallèlement avec la grandeur des couples.

En résumé, dans cette étude sur les variations thermiques de l'aimantation de la pyrrhotine, nous avons rencontré dans les pyrrhotines normales des propriétés relativement simples se coordonnant avec les connaissances déjà acquises sur la même substance à la température ordinaire et contribuant à donner un tableau des propriétés magnétiques de cette substance doué d'une certaine unité. A la vérité il n'est pas difficile de trouver des lacunes à ces connaissances. Si l'on rencontre un jour un cristal simple, il sera plus facile de les combler; et il sera aussi tout indiqué de soumettre les lois que nous avons trouvées à des vérifications plus rigoureuses.

Dans les substances anormales, au contraire, nous avons rencontré une multitude de faits inconnus dans les substances normales et dont les principaux sont les changements d'état magnétique, l'irré-

versibilité thermique, l'influence du temps, les variations apparentes des groupements et l'approximation plus ou moins grossière dans la propriété du plan magnétique. Tous ces faits sont à peine esquissés et leurs rôles ne sont pas toujours séparés. Leur étude plus approfondie conduira vraisemblablement à une nouvelle extension de nos connaissances générales sur le ferromagnétisme.

Étude photométrique des images formées par les systèmes optiques;

Par M. E. Haudié.

Il peut être de quelque intérêt de montrer que, pour tous les types usuels de systèmes optiques, simples ou complexes, les conclusions ordinaires relatives à la clarté et à l'éclairement découlent immédiatement des deux propriétés fondamentales relatives à l'éclat intrinsèque et à l'éclairement d'une image, propriétés mises en lumière par Kirchhoff et par Cornu.

Grâce à cette remarque, l'étude photométrique des images est susceptible de former un ensemble simple et ordonné ; les méthodes et considérations variées auxquelles on a recours trop souvent dans un exposé morcelé deviennent superflues et doivent faire place à un mode d'exposition unique.

La notion fondamentale est naturellement celle de flux lumineux; et il suffit d'exprimer que, dans son passage à travers un système optique quelconque, le flux se conserve, abstraction faite des pertes par transmission. Le coefficient de transmission k peut d'ailleurs être déterminé par des méthodes variées (Cornu, Wolf, Blondel) ; il est le plus souvent voisin de 0,9 pour les lentilles simples ou accolées, et par suite voisin de $(0,9)^2$, c'est-à-dire de 0,8, pour les systèmes doubles (oculaires composés, objectifs photographiques)[1].

I. *Éclat intrinsèque de l'image.* — AB est un objet lumineux, ou une portion d'objet telle que cette source lumineuse étendue puisse être considérée comme uniforme. Ω et Ω' sont les angles solides communs à tous les points de l'objet ou de l'image ; Σ est la surface *apparente* du système optique. L'image A'B' est indifféremment réelle ou virtuelle.

---

[1] Nous nous conformerons aux définitions et notations de M. Blondel, sanctionnées par le Congrès de Genève (*J. de Phys.*, 3e série, t. VI, p. 193 ; 1897).

L'égalité du flux envoyé par la source sur le système optique et du flux reçu par l'image donne $\Phi = I\Omega = I'\Omega'$. Mais $I = eS$, $I' = e'S'$; puis $\Omega = \frac{\Sigma}{p^2}$, $\Omega' = \frac{\Sigma}{p'^2}$; et, en supposant les mêmes milieux extrêmes, $\frac{S'}{S} = \frac{p'^2}{p^2}$. D'où résulte l'*égalité* entre l'éclat intrinsèque de l'image et celui de l'objet :

$$e' = e. \tag{1}$$

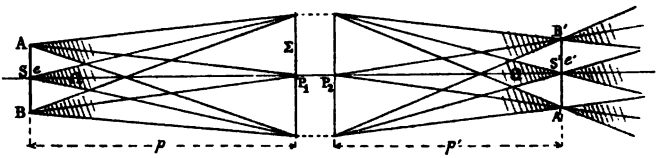


FIG. 1.

Dans le cas d'un second milieu d'indice n par rapport au premier, on aurait

$$e' = n^2 e \text{ [1]}. \tag{1 bis}$$

II. *Éclairement de l'image.* — Par définition, l'éclairement de l'image est $E = \frac{\Phi}{S'}$. Mais, d'après ce qui précède, $\Phi = \frac{eS'\Sigma}{p'^2}$; d'où la relation connue :

$$E = \frac{e\Sigma}{p'^2}. \tag{2}$$

Elle exprime la propriété des lentilles dont M. Cornu a fait ressortir l'intérêt [2] en l'appliquant dans son dispositif de l'œil-de-chat.

Dans un second milieu d'indice n, l'éclairement de l'image serait

$$E = \frac{n^2 e\Sigma}{p'^2}. \tag{2 bis}$$

Étant donnée la relation (1) ou (1 *bis*), on peut se rendre compte immédiatement que, dans le cas de systèmes optiques complexes donnant lieu à la formation d'images *successives*, la formule (2) ou (2 *bis*)

---

[1] Ce théorème général a été démontré par Kirchhoff pour toute espèce de radiations [*Emission und Absorption von Licht und Wärme* (*Monatsber. der Berliner Akad.*; 1859)].

[2] CORNU, *Annales de l'Observatoire*, t. XIII ; — et *J. de Phys.*, t. X, p. 189 ; 1881.

peut s'appliquer à *l'une quelconque* des images. Σ représente la section des faisceaux qui traversent l'élément optique correspondant.

III. *Notion de source secondaire de lumière.* — La relation (2), par son rapprochement avec la loi d'éclairement d'une source en fonction de la distance, $E = \frac{I}{l^2}$, a permis à M. Cornu de conclure que tout système optique se comporte comme une source secondaire de lumière définie par

$$I = e\Sigma, \tag{3}$$

c'est-à-dire ayant même éclat intrinsèque que la source lumineuse.

L'intensité lumineuse du faisceau émergent dépend donc, non pas de l'étendue ou de l'intensité de la source, mais uniquement de son éclat intrinsèque. La seule étendue qui importe est celle du système optique ; c'est un résultat d'importance capitale dans le cas des projecteurs et des panneaux lenticulaires de phares [1].

De plus, à égalité de surface Σ, rien n'empêche de prendre un système optique inégalement étendu de part et d'autre de l'axe. Cette disposition dissymétrique, appliquée aux phares, a permis d'obtenir des feux à éclats groupés.

IV. *Cas des images rétiniennes. — Clarté des instruments oculaires.* L'élément qui fait juger plus ou moins lumineux un objet vu à l'œil nu, ou dans une lunette ou un microscope, est le flux reçu par unité de surface de la rétine ; autrement dit, c'est l'éclairement de l'image rétinienne. Cette image étant formée par le système optique de l'œil, son éclairement est donné par (2 *bis*). Σ représente alors l'ouverture de la pupille, n l'indice de l'humeur vitrée, et p' la distance du second point principal à la rétine.

---

[1] Il importe de remarquer que la relation (3) ne se trouve démontrée que par la considération des images. D'ailleurs, pour toute autre position de l'écran, l'éclairement n'est plus aussi uniforme. D'autre part, dans le cas d'ouvertures aussi considérables que celles des miroirs de projecteurs et des panneaux lenticulaires, la relation (3), alors trop peu exacte, doit être remplacée par $I = \int e' d\Sigma$, et c'est expérimentalement (Blondel et Rey, *C. R*, t. CXXVI, p. 404) qu'on détermine la série des éclats apparents e' suivant les zones successives. M. Blondel (*Théorie des projecteurs électriques*, Lefebvre-Ducrocq, Lille, ou Lahure, Paris) a d'ailleurs développé un mode d'exposition très général, mais nécessairement plus laborieux, qui se trouve valable pour toute distance, et tient compte, pour chaque zone, des valeurs particulières des coefficients de divergence et du coefficient de transmission.

Mais on peut remarquer que, dans tout instrument, l'œil, normal ou myope, met au point sans avoir aucune tendance à accommoder [1]. Par suite, p' demeure constant, de sorte que $\frac{n^2}{p'^2}$ est une *constante* K de l'œil, et l'éclairement de l'image rétinienne peut s'exprimer par la *loi simple*

$$E = Ke\Sigma. \tag{4}$$

La *clarté* d'un instrument étant le rapport $\frac{E'}{E}$ des éclairements des images rétiniennes correspondant à la vision au travers de l'instrument et à l'œil nu, on a :

$$\text{clarté} = \frac{e'\Sigma'}{e\Sigma}.$$

En faisant abstraction des pertes par transmission, la clarté s'exprime par le simple rapport $\frac{\Sigma'}{\Sigma}$. La section Σ' du faisceau fourni à l'œil par l'instrument ne peut qu'être inférieure, ou au plus égale à l'étendue Σ de la pupille, suivant que le cercle oculaire est inférieur, égal ou supérieur à la pupille.

De là dérivent immédiatement toutes les conclusions connues relatives au microscope et aux lunettes de jour ou de nuit.

La *clarté pratique* diffère uniquement en ce que, en réalité, $e' = (0,9)^n e$, n étant le nombre des lentilles séparées qui constituent l'instrument. Donc

$$\text{clarté réelle} = (0,9)^n \frac{\Sigma'}{\Sigma} \text{ [2]}. \tag{5}$$

En ce qui concerne le cas des objets sans diamètre apparent sensible, il suffit de rappeler que l'accroissement de clarté résulte immédiatement du fait que, à la sortie de l'instrument, le même flux

---

(1) Pour les distances supérieures à 50 mètres, ou même 25 mètres, un œil normal n'a plus à accommoder (Sissingh, *Rev. gén. des Sciences*, p. 218; 28 février 1903).

(2) La clarté semble parfois, la nuit, devenir *supérieure* à l'unité. Herschell et Holden (*J. de Phys.*, 2e série, t. I, p. 153; 1882) rapportent deux observations de ce genre. La nuit, dans une lunette ou un télescope, l'heure était parfaitement visible au cadran d'un clocher, alors qu'à l'œil nu il était impossible de distinguer le clocher lui-même. Le même phénomène peut s'observer, la nuit, avec toute jumelle galiléique. N'est-ce pas simplement dû à ce que, la nuit, la monture même de l'oculaire forme un écran opaque suffisant pour que la pupille, alors si facilement extensible, se dilate encore plus que dans l'observation à l'œil nu?

lumineux se trouve condensé dans un faisceau de section G^2 fois moindre, de sorte que, à section égale, le faisceau fourni par l'instrument apporte un flux G^2 fois plus intense que le faisceau relatif à l'œil nu.

V. *Cas des images réelles* (*images projetées ou photographiques*). — Le cas de l'œil-de-chat de Cornu est exactement celui de toute lentille ou de toute combinaison diaphragmée, qui produit une image sur un écran ou sur une surface sensible.

L'élément essentiel est encore l'éclairement de l'image.

En photographie, c'est uniquement de l'éclairement E que dépend le temps de pose T, car l'impression photographique exige par unité de surface une quantité de lumière déterminée $Q = ET$, qu'on considère comme constante, du moins dans les conditions ordinaires.

La formule d'éclairement (2) résout complètement le problème [1]. Toutefois on trouve commode de la mettre sous une forme capable de faire apparaître plus explicitement les échelles de temps de pose.

Pour l'établissement de ces échelles, on est convenu officiellement de faire abstraction des pertes de lumière et de se borner au cas des objets éloignés. Par suite, p' devient la distance focale φ de l'objectif photographique. D'autre part, si d est le diamètre d'ouverture utile [2] correspondant à un diaphragme donné, on a $\Sigma = \frac{\pi d^2}{4}$, d'où

$$E = e\,\frac{\pi}{4}\left(\frac{d}{\varphi}\right)^2.$$

Cette formule démontre que l'éclairement dépend, non pas de la distance focale absolue d'un objectif, mais seulement du rapport $\frac{d}{\varphi} = \frac{1}{n}$ (objectif diaphragmé au n^e). D'où

$$E = e\,\frac{\pi}{4}\,\frac{1}{n^2}. \tag{6}$$

Par exemple, la série des temps de pose va constamment en doublant (série normale), si la progression géométrique des valeurs de n admet pour raison $\sqrt{2}$.

Il est facile de montrer que les combinaisons formant *téléobjectifs* peuvent être étudiées sans plus de difficulté.

---

(1) Elle convient également au cas des images produites par un simple trou (Moessard, *l'Optique photographique*, p. 141).

(2) Wallon, *Choix et Usage des objectifs photographiques*, p. 99; — *l'Objectif photographique*, p. 85.

Tout d'abord, les téléobjectifs usuels ayant simplement pour but de substituer à l'image ordinaire A'B' fournie par l'objectif O une image A"B" agrandie par la lentille divergente, le même flux se trouve réparti sur une image *agrandie* linéairement γ fois, et par suite devient γ^2 fois plus faible par unité de surface :

$$E_{A''B''} = e\,\frac{\pi}{4}\left(\frac{d}{\gamma\varphi}\right)^2 \qquad \text{ou} \qquad (7)\ E_{A''B''} = e\,\frac{\pi}{4}\,\frac{1}{\gamma^2 n^2}.$$

Le temps de pose est γ^2 fois plus long qu'avec l'objectif d'avant seul.

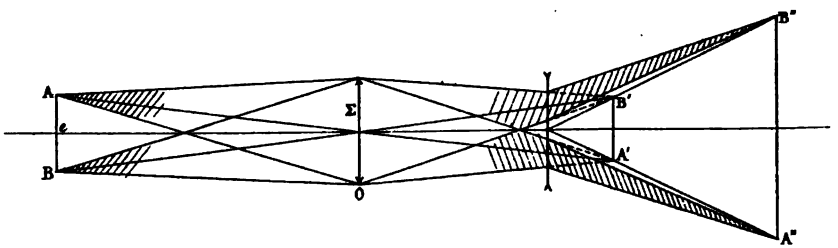


Fig. 2.

Un *autre type* de téléobjectif, dont nous signalons d'autre part l'intérêt particulier, consiste à placer en avant d'un objectif photographique O une lunette d'un type quelconque (*fig.* 1, p. 420).

L'objectif photographique, de distance focale φ, donne, de l'image A"B" considérée comme objet, et ayant, aux pertes près, même éclat intrinsèque e que l'objet AB, une image a_1b_1 dont l'éclairement est, d'après (2),

$$E_{a_1b_1} = \frac{e\Sigma}{\varphi^2}.$$

Σ est l'étendue des faisceaux qui tombent sur l'objectif photographique O. Or, pour toute lunette réglée préalablement par une vue normale, l'image A"B" est assez lointaine pour que les faisceaux qui traversent le cercle oculaire dd' (réel ou virtuel), de diamètre δ, soient très sensiblement cylindriques ; par suite

$$\Sigma = \frac{\pi\delta^2}{4},$$

et

$$(8) \qquad E_{a_1b_1} = e\,\frac{\pi}{4}\left(\frac{\delta}{\varphi}\right)^2.$$

L'intérêt de cette expression ressortira plus loin.

Pour ce type de téléobjectif, c'est non pas par rapport à l'image A'B' formée par l'objectif de la lunette qu'il y a intérêt d'évaluer l'agrandissement γ, mais bien par rapport à l'image *ab* que donne l'objectif photographique seul.

Lorsqu'on l'envisage ainsi, l'agrandissement n'est autre que le grossissement G de la lunette, comme on s'en rendra compte d'autre part.

Détermination, au moyen d'un appareil photographique, du grossissement et du champ des lunettes galiléiques ou astronomiques (1) ;

Par M. E. Haudié.

I. Lorsqu'on ne dispose pas d'un théodolite ou d'une lunette micrométrique permettant d'appliquer la méthode de Gauss à la mesure du grossissement, la seule méthode qui existe dans le cas des lunettes galiléiques est celle de la *chambre claire*. Cette méthode ne donne en pratique qu'une mesure grossière et incertaine, car les images à superposer ne sont jamais également distinctes, et il est en outre difficile de s'affranchir de toute lumière diffuse. De plus, elle n'est applicable que si l'observateur possède une vue normale, et elle donne le seul grossissement nominal $G = \frac{F}{f}$.

II. Il est facile de la transformer avantageusement en substituant à l'œil un *appareil photographique*, de manière à constituer avec toute lunette (astronomique ou galiléique) un *téléobjectif*. Il suffit alors que la glace dépolie porte une échelle divisée pour qu'il devienne possible, sans chambre claire, de mesurer *successivement* et dans les mêmes conditions de netteté les deux images à comparer. L'observation ne dépend plus de la vue de la personne. En outre, ce dispositif est le seul qui permette la mesure du grossissement d'une lunette dans des conditions quelconques de mise au point.

Il n'est plus besoin d'une mire spéciale ; tout objet éloigné peut convenir. A l'égard du dispositif destiné à assujettir la lunette, la forme importe peu ; il convient toutefois d'avoir à sa disposition les déplacements nécessaires pour permettre de réaliser un système total suffisamment centré. L'objectif, sans distorsion, peut être un

---

(1) Méthode présentée à l'Exposition de la Société de Physique (Pâques 1905 ; Musée pédagogique).

simple rectilinéaire symétrique. La graduation sur la glace dépolie

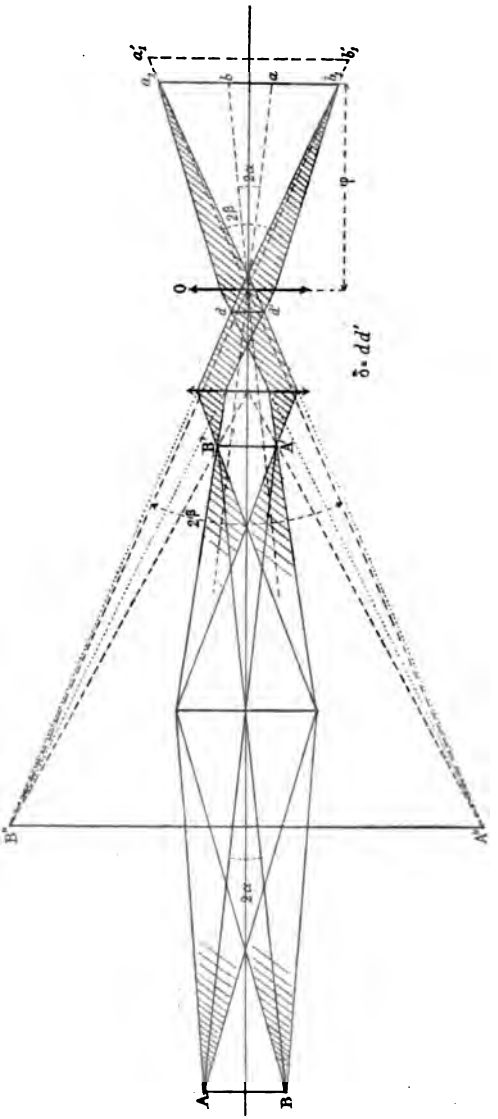


Fig. 1.

sera, par exemple, en demi-millimètres, avec une partie centrale, sur une longueur de 2 centimètres, graduée en dixièmes de millimètre.

Cliché obtenu avec une jumelle à prismes Krauss
(diamètre du cercle oculaire 2^{mm})

Cliché direct

III. L'image réelle, obtenue par interposition de la lunette, se trouve amplifiée par rapport à celle que donne l'objectif seul, dans le rapport même du grossissement.

Pour se placer dans les conditions précises du *grossissement nominal* $G = \frac{F}{f}$, il faut que la lunette, réglée sur un objet éloigné, soit mise au point à l'infini. Or, si l'appareil photographique a été préalablement réglé aussi sur un objet éloigné, cette mise au point de la lunette se trouve réalisée d'elle-même au moment où, après avoir agi sur la lunette seule, l'image agrandie du même objet se trouve nette sur la glace dépolie. La lecture de a_1b_1 et de ab donne immédiatement

$$G = \frac{F}{f} = \frac{a_1b_1}{ab}.$$

IV. La *précision absolue* des mesures peut, avec une loupe de mise au point, être la même que dans la méthode du dynamomètre. Quant à la précision *relative*, elle devient d'autant plus grande que l'image ab de l'objet choisi est plus grande par rapport au diamètre du cercle oculaire.

A ce point de vue, il est avantageux, lorsqu'il s'agit d'un grossissement élevé, de passer par l'intermédiaire d'une image auxiliaire $a'b'$ moins amplifiée que a_1b_1. On a alors $G = \frac{a_1b_1}{a'b'} \times \frac{a'b'}{ab}$. Et dans la détermination du second rapport on peut remplacer $a'b'$ et ab par deux autres éléments homologues $a'c'$ et ac, plus étendus, d'où une précision plus grande. L'image $a'b'c'$ peut être fournie par une autre lunette de grossissement intermédiaire, ou même simplement par un autre objectif photographique de plus long foyer.

V. L'expérience démontre que, si un œil normal met effectivement au point sans accommoder, il s'en faut toutefois qu'il reporte vraiment l'image à l'infini ; dans l'opération précédente, il est en effet toujours nécessaire d'allonger le tirage quand la lunette a été préalablement réglée par une vue normale.

Pour mesurer le *grossissement effectif* relatif à ces conditions de visée, on conserve la mise au point de la lunette, et on recule la glace dépolie jusqu'à la position qui donne une image nette $a_1'b_1'$. La distance focale de l'objectif étant φ (la mesure de φ est facile pour un rectilinéaire symétrique où les deux points nodaux sont confon-

dus), s'il a fallu reculer la glace de ε, c'est que

$$G = \frac{2\beta}{2\alpha} = \frac{a_1'b_1'}{\varphi + \varepsilon} : \frac{ab}{\varphi}.$$

On obtient ainsi en particulier le grossissement effectif pour un myope. Mais il convient de remarquer alors que le myope, avec ses besicles, voit les objets sous un diamètre apparent $2\alpha'$ sensiblement inférieur à 2α. Il est possible de calculer le grossissement réel $\frac{2\beta}{2\alpha'}$, en communiquant la même myopie à l'objectif photographique, c'est-à-dire en l'armant, lors de l'observation de ab, d'un des verres du myope, placé sensiblement à la distance correspondante. Dans l'expression précédente, φ se trouve alors remplacé par une longueur plus grande φ'.

VI. Bien que le système optique des lunettes ne *soit pas achromatisé* pour les rayons chimiques, on obtiendra néanmoins, en quelques secondes, un *cliché* d'une netteté très satisfaisante à l'égard de l'objet visé, à la condition essentielle de se servir d'un écran jaune formant un filtre suffisant, et de prendre de préférence les plaques « orthochromatiques » ou « panchromatiques » du commerce. Afin d'éliminer toute lumière étrangère, on relie l'oculaire de la lunette à l'objectif photographique au moyen d'un morceau de tube de caoutchouc (chambre à air de pneumatique, par exemple).

VII. L'*éclairement* de l'image amplifiée a_1b_1 est donné par l'expression (8) établie d'autre part :

$$E_{a_1b_1} = e\,\frac{\pi}{4}\left(\frac{\delta}{\varphi}\right)^2.$$

a. Il ressort immédiatement de là que, pour un objectif photographique et un objet donnés, l'éclairement dépend exclusivement de δ, c'est-à-dire dd' ; il est *proportionnel* à l'étendue du cercle oculaire (réel ou virtuel). A *égalité* de cercle oculaire, l'éclairement et le temps de pose demeurent les mêmes, quel que soit le grossissement.

b. L'éclairement est d'autant plus faible, et la pose plus longue, que φ est plus grand. Il convient, pour un cercle oculaire, de 3 millimètres par exemple, de ne pas dépasser sensiblement les valeurs de φ qui correspondent au format 9×12 (12 à 15 centimètres).

VIII. Comme, à l'égard des faisceaux utilisés, le véritable dia-

phragme est le cercle oculaire, il n'y a pas lieu, *a priori*, de diaphragmer l'objectif photographique O.

a. Dans le cas d'une lunette astronomique, la position *naturelle* à donner à O est celle qui permet de faire correspondre le plan de son diaphragme avec le cercle oculaire transformé par la lentille d'avant de l'objectif. Il est le plus souvent possible de rapprocher O jusqu'à cette position ; on la reconnaît à ce que le diaphragme de l'objectif possède alors les propriétés du cercle oculaire : la réduction progressive du diaphragme a pour seul effet d'affaiblir l'éclairement de l'image, sans diminuer le champ. Dans ces conditions, le cercle éclairé représente exactement le *champ* apparent 2β de l'instrument.

S'il n'est pas possible d'atteindre cette position même, on peut cependant être assuré d'avoir encore le *champ entier* pour les positions un peu plus éloignées, telles qu'on puisse commencer à réduire le diaphragme de l'objectif sans que le champ commence immédiatement à décroître.

La méthode actuelle permet donc, en même temps, une *détermination rapide* du champ 2α de la lunette, sans avoir besoin d'aucun cercle divisé.

Pour obtenir une netteté uniforme sur toute la circonférence de pourtour du champ, il faut que le centrage du système soit très sensiblement réalisé. C'est même là ce qui fournit en pratique le moyen le plus simple pour arriver à centrer.

b. Dans le cas d'une lunette galiléique, le champ total, qui comprend alors, comme on sait, une pénombre périphérique, est naturellement variable avec l'ouverture et la distance de l'objectif O. Pour obtenir le champ relatif à des conditions données de vision, il faut assigner à l'objectif une position et une ouverture correspondantes à celles de la pupille.

En ce qui concerne le champ de *pleine lumière*, la connaissance exacte de G permet de le calculer, car au moyen de G on obtient aisément la dimension et la distance du cercle oculaire.

IX. La détermination numérique simple de G fournit un moyen commode de connaître sensiblement la distance focale f d'un oculaire composé ou d'un oculaire divergent, puisqu'elle permet de remplacer cette mesure par la mesure correspondante de F, qui est beaucoup plus aisée.

Sur les résistances de contact;

Par M. A. Blanc [1].

Le caractère essentiel d'une résistance de contact est de présenter le phénomène de la cohération : la résistance, qui peut être initialement grande, éprouve une diminution considérable sous l'action d'une onde électrique ou d'un courant qui traverse le contact. Cette diminution est persistante dans les cohéreurs ordinaires, qui ne reprennent une grande résistance que sous l'action d'un choc ; elle a la même durée que la cause qui la produit dans les cohéreurs dits *autodécohérents*.

Quant aux cohéreurs qu'on a appelés anticohéreurs ou cohéreurs négatifs, qui éprouvent une augmentation de résistance sous l'action de l'onde électrique, il faut les mettre à part, car le phénomène qu'ils présentent paraît dû à des actions secondaires qui viennent masquer la cohération ordinaire.

Les nombreuses théories qu'on a proposées pour expliquer la cohération peuvent être classées de la façon suivante :

I. Les théories qui attribuent la grande résistance initiale à une couche diélectrique interposée, et la diminution de résistance à une modification de ce diélectrique, qui devient conducteur. C'est la théorie de Branly ; l'expérience lui est peu favorable, et la nature du diélectrique ne paraît pas avoir d'influence sensible.

II. Les théories où la grande résistance initiale est encore attribuée à une couche diélectrique ou mauvaise conductrice, mais où la diminution de résistance est due à ce que cette couche a été écartée ou détruite, et un pont s'est établi entre les surfaces métalliques. Ainsi Lodge admet qu'il se forme de petites étincelles qui percent le diélectrique, arrachent aux conducteurs des particules métalliques et les soudent ensemble, formant un pont ininterrompu. Mais les expériences qui ont semblé justifier cette explication ont été faites avec des radiations beaucoup plus intenses que celles qui agissent d'habitude sur un cohéreur, et ne permettent pas de conclure que des étincelles se produisent toujours.

On a encore parfois émis l'hypothèse que la couche mauvaise

[1] Séance du 5 mai 1905.

conductrice superficielle est formée de vapeur d'eau, ou encore d'oxyde, qui disparaîtrait sous l'action du courant par un mécanisme plus ou moins mystérieux.

III. Enfin, certaines théories ne font intervenir que les conducteurs métalliques : la grande résistance initiale serait due à ce que le courant passe d'un métal à l'autre par une surface très petite. La cohération consisterait en une amélioration du contact, soit que le courant dégage assez de chaleur pour fondre les métaux dans le voisinage du contact, et provoquer ainsi leur soudure, soit qu'il se crée encore un pont à côté du contact primitif. Bose suppose enfin qu'il se produit, sous l'action des ondes électriques, une véritable transformation allotropique du métal, la variété ainsi produite étant plus conductrice que la première.

Aucune des théories proposées n'est complètement satisfaisante et ne permet d'expliquer les détails du phénomène de la cohération, alors même que l'expérience ne les contredit pas.

Étude optique du cohéreur. — Pour voir si la cohération peut se produire quand il existe une couche de diélectrique interposée entre les deux surfaces conductrices, et si elle est accompagnée d'une modification visible, j'ai examiné le contact au microscope en produisant en même temps entre les surfaces des franges d'interférence qui font connaître leur distance.

Le contact est établi entre un couvre-objet de microscope en verre très mince, argenté sur une face, et une bille d'acier polie avec le plus grand soin, de façon à former un excellent miroir. L'argenture du couvre-objet, obtenue par le procédé Izarn, est assez mince pour être très transparente. La lame de verre est serrée, par l'intermédiaire de papier d'étain et de plaques de cuivre bien planes, dans deux pinces à vis portées par le couvercle de la caisse qui contient tout l'appareil. La bille est soudée à une pièce de laiton vissée sur un appareil à anneaux de Newton, qui permet de la déplacer très lentement dans le sens vertical.

Le microscope est porté par un support spécial, isolé du reste de l'appareil, et qui permet, grâce à deux mouvements de directions rectangulaires, d'explorer tout le plan de la lame. On éclaire le contact par la partie supérieure, à l'aide d'un système éclaireur de Le Chatelier.

I. J'ai d'abord cherché à voir si le courant peut passer d'une surface à l'autre avant qu'elles se touchent. Le contact est défini par le

moment où apparaît la dernière tache centrale, qui s'élargit ensuite très lentement, sans donner naissance à un anneau. Un galvanomètre sensible, intercalé dans le circuit du contact, avertit de son côté du moment où le courant est établi.

Si on n'évite pas avec le plus grand soin que des parcelles d'argent, enlevées par exemple à la lame par les contacts antérieurs, ne restent intercalées entre les surfaces, il arrive que le courant paraît s'établir à quelques anneaux de distance du contact; mais le phénomène ne présente alors aucune régularité, et on voit fort bien les parcelles d'argent perturbatrices au microscope.

Quand on opère avec des lames d'argent absolument neuves, *le courant ne passe jamais avant qu'il y ait contact*, la force électromotrice employée étant celle d'un daniell.

J'ai fait croître progressivement la différence de potentiel qui existe entre les deux surfaces, avant que le courant passe, jusqu'à 95 volts. Il n'y a rien de changé jusqu'à ce que, la différence de potentiel étant suffisante, il se produise pour une certaine distance l'arrachement de l'argent, accompagné d'une étincelle. Le courant ne continue pas toujours de passer quand les premières étincelles se sont produites, mais il s'établit toujours alors avant le contact, grâce au pont formé par les particules métalliques.

La valeur de la différence de potentiel pour laquelle on commence à voir des étincelles dépend essentiellement de la solidité de la couche d'argent employée; il en est de même pour la distance explosive. On se trouve dans la région de la couche des potentiels explosifs étudiée par Earhart (1) et récemment prolongée par Kinsley (2); tout dépend de la nature du métal et le diélectrique n'intervient pas.

Ce qui semble intervenir surtout, c'est la facilité avec laquelle le métal superficiel se laisse arracher sous l'action de la tension électrique; ainsi le changement du diélectrique intervient en ce que la tension est proportionnelle à K. Si on interpose une goutte d'huile de vaseline, la distance explosive augmente, pour la même différence de potentiel, contrairement à ce qui aurait lieu pour les distances ordinaires.

En somme, le diélectrique ne paraît nullement jouer le rôle essentiel dans la cohération.

---

(1) Earhart, *Philosophical Magazine*, t. I, p. 147; 1901.
(2) Kinsley, *Philosophical Magazine*, t. IX; mai 1905.

11. La cohération de ce contact argent-acier peut être très considérable : une étincelle de $0^{mm},25$ suffit pour faire tomber la résistance de 9.000 ohms à 6 ohms.

Mais ce phénomène n'est accompagné d'aucune modification apparente. Si l'étincelle cohératrice est forte, elle peut cependant provoquer dans le contact une petite étincelle accompagnée de l'arrachement d'une petite surface d'argent, de sorte que le courant qui ne passait pas peut se mettre à passer. Mais, avec les étincelles très courtes que j'employais, il n'y avait jamais d'étincelle dans le contact, et la cohération ne se produisait que lorsque le contact était déjà réel.

Même avec un grossissement de 920, je n'ai jamais constaté aucun changement dans le contact au moment de la cohération; l'aspect de la couche d'argent n'est pas modifié, et, si on retire la bille, la lame est identique à ce qu'elle était avant le contact, pourvu qu'elle soit assez solide.

En tout cas, *on ne voit se produire ni un pont* (sauf des cas exceptionnels, et c'est alors un phénomène parasite) *ni une fusion; la cohération ne doit porter que sur les couches purement superficielles des métaux.*

Action des radiations sur le contact. — On a parfois émis l'idée qu'il pouvait se produire une ionisation du diélectrique interposé entre les surfaces du contact; il était donc intéressant d'examiner l'action sur le cohéreur des diverses radiations capables de produire une telle ionisation.

1° J'ai examiné l'action de la lumière ultra-violette produite par l'arc éclatant entre deux charbons, ou entre un charbon et une tige de zinc, ou encore fournie par une lampe au magnésium, sur un contact formé d'une bille d'acier et d'une lame de mica très mince ou d'une lame de silice fondue, argentées très faiblement sur une face. On est certain ainsi que la lumière ultra-violette arrive à la région du contact.

Je n'ai jamais constaté aucune action, ni sur la résistance même du contact avant ou après sa cohération, ni sur sa sensibilité à la cohération.

2° J'ai exposé le contact établi entre une bille d'acier et une lame mince d'aluminium aux rayons Röntgen ; ceux-ci étaient produits, afin de mettre le cohéreur à l'abri des décharges qui leur donnent naissance, à l'intérieur d'une boîte en bois tapissée de papier d'étain

et présentant sur une face une fenêtre fermée par une lame d'aluminium.

Il n'y a jamais eu aucune action des rayons Röntgen sur le contact, ni avant la cohération, ni après; et la sensibilité est toujours restée la même.

Il en a été de même quand le contact a été exposé aux rayons émis par une petite quantité de chlorure de radium.

3° Enfin, j'ai étudié l'action des rayons calorifiques émis par un bec Auer placé à une distance de 20 centimètres du contact; le contact était formé par une lame très mince de mica argentée.

Avant toute cohération du contact, le fait d'allumer le bec Auer est toujours suivi d'une variation de la résistance; mais cette variation est irrégulière : c'est tantôt une augmentation, tantôt une diminution, et elle n'est jamais instantanée. Quand on éteint le bec Auer, il se produit une variation analogue, tout aussi irrégulière. La variation de résistance doit provenir de dilatations irrégulières produites par la légère élévation de température que cause le bec Auer.

Après cohération préalable du contact, le fait d'allumer le bec Auer est toujours suivi de décohération. Il en est de même si on éteint le bec Auer après avoir cohéré pendant qu'il était allumé. Ce qui est intéressant, c'est que *la décohération est progressive et continue*, ce qui montre que, si la cohération disparaît d'une façon brusque sous l'action d'un choc, elle peut disparaître lentement sous l'action d'une cause moins brutale. Cette décohération est encore due à l'effet mécanique provenant des dilatations qui se produisent dans le contact.

Enfin la *sensibilité* n'est pas modifiée par les rayons qui viennent du bec Auer. Il n'en serait plus de même si on portait le contact à une température élevée : Guthe [1] a montré que, dans ce cas, la sensibilité du contact augmente. Et, si une des surfaces est plus chaude que l'autre, la sensibilité est plus grande quand le courant passe de la surface chaude à la surface froide que lorsqu'il passe dans l'autre sens : premier exemple d'une dissymétrie que nous retrouverons plus loin.

Rôle des oxydes et des gaz condensés. — 1. Lorsqu'on produit un contact entre deux surfaces d'acier fraîchement polies, on obtient un cohéreur tout aussi bien qu'avec deux surfaces polies depuis un cer-

---

[1] Guthe, *Annalen der Physik*, t. IV, p. 762; 1901.

tain temps; il est donc peu probable qu'une couche d'oxyde soit indispensable pour qu'on ait un cohéreur. On peut d'ailleurs montrer de la façon suivante que la cohération n'est pas due à la disparition de la couche d'oxyde :

On peut réaliser deux gouttes de mercure qui viennent au contact sans se confondre, en prenant du mercure fraîchement distillé auquel on ajoute des traces d'un autre mercure distillé depuis plus longtemps et, par conséquent, légèrement oxydé. Le contact ainsi réalisé présente une résistance considérable; il constitue un cohéreur très sensible, et les gouttes ne se soudent pas quand la cohération se produit; la pellicule d'oxyde qui les séparait n'est donc pas crevée, et la modification qui s'est produite, quelle qu'elle soit, n'a porté que sur cette pellicule. Toutefois la résistance finale est toujours plus grande que dans le cas de l'acier bien poli, précisément parce que l'oxyde subsiste.

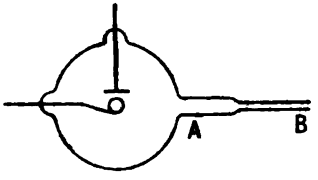


Fig. 1.

II. J'ai étudié un contact qui pouvait être placé dans un vide excellent; une bille d'acier portée par un ressort de flexion (*fig.* 1) peut venir s'appuyer sur un petit plan d'acier fixe, quand le tube qui porte le tout est convenablement placé; en retournant le tube de 180° autour de l'axe AB, la bille, par son poids, quitte le plan et en est séparée par une distance d'environ 1 centimètre.

On produit le contact après avoir fait le vide et on fait une série de mesures, puis on fait rentrer l'air à la pression atmosphérique et on fait une nouvelle série. Il n'y a aucune différence appréciable entre les deux. Il en est de même quand on produit pendant longtemps des rayons cathodiques entre les deux surfaces, de façon à faire dégager les gaz qui pouvaient s'y trouver condensés.

Ainsi *ni l'oxyde, ni les gaz condensés ne jouent le rôle essentiel dans le phénomène.*

Action de la pression sur la résistance de contact. — La résistance du contact dépend des déformations éprouvées sous l'action de la pres-

sion par les corps qui le constituent. Or Hertz a donné des formules qui permettent de calculer les déformations, dans le cas où les corps sont homogènes, isotropes, élastiques et parfaitement polis, et les déformations très petites [1]. On peut en déduire la résistance du contact en supposant que la conductibilité des métaux qui le constituent est partout la même; mais la résistance trouvée expérimentalement est toujours trop grande, et, tandis que la théorie conduit pour la variation de la résistance en fonction de la pression à une formule de la forme :

$$W = \frac{c}{p^{\frac{2}{3}}},$$

l'expérience donne plutôt, d'après Meyer [2] :

$$W = \frac{c}{p^{1,07}}.$$

On en conclut qu'en outre de la déformation qu'elle produit la pression doit avoir une influence en chaque point de la surface de contact, de sorte que la résistance en ce point est inversement proportionnelle à la pression qui y existe. Les pressions considérées par Meyer étaient relativement grandes. L'action de la pression doit être surtout importante, quand la pression est très faible, si elle est due, comme il paraît naturel de le supposer, à l'existence de couches de passage à la surface des métaux.

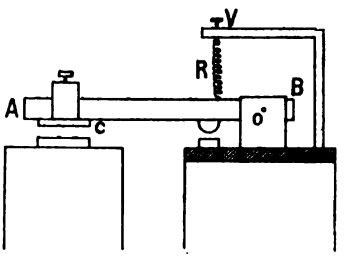


Fig. 2.

Il faut donc étudier la résistance du contact pour des pressions voisines de zéro; la grande difficulté est alors, pour avoir des résultats réguliers, d'éviter les chocs ainsi que les variations brusques de pression. L'appareil que j'ai employé est représenté par la *fig.* 2. Le

(1) Hertz, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, t. XCII, p. 156.
(2) *Annalen der Physik*, t. LXVI, p. 760; 1898.

contact est réalisé entre un petit plan d'acier et une bille d'acier soudée au levier AB ; la pression est produite grâce à l'attraction qu'exerce un électro-aimant sur le disque de fer doux C porté par le même levier. On peut régler la distance du disque C au noyau de l'électro-aimant, et on peut ensuite faire varier la pression sur le contact en faisant varier, à l'aide d'une résistance liquide, l'intensité du courant qui passe dans l'électro-aimant ; comme l'aimantation du noyau de l'électro-aimant et du disque C n'est jamais bien grande, on peut admettre que la pression exercée est proportionnelle au carré de l'intensité, en tenant compte naturellement de l'intensité qu'avait le courant au moment où le contact s'est réellement établi.

Le même appareil permet d'opérer par pressions décroissantes en retournant la pièce C et disposant l'électro-aimant au-dessus du disque de fer doux.

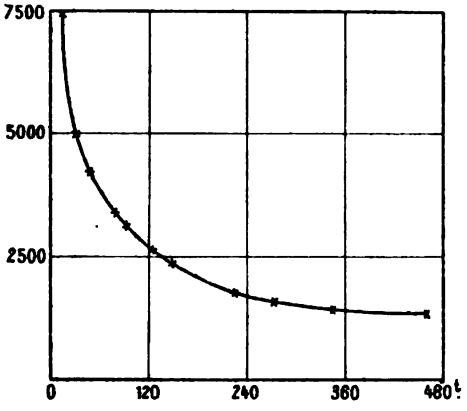


Fig. 3.

I. On constate d'abord que, si on établit une pression donnée sur le contact, la résistance ne prend pas une valeur fixe, mais diminue pendant longtemps avec les caractères que nous retrouverons pour la cohération par le courant : la diminution de résistance, d'abord très rapide, devient beaucoup plus lente, et la résistance paraît tendre vers une valeur limite. C'est ce que montre la courbe de la *fig.* 3.

La diminution de résistance avec le temps est facilitée par des trépidations très légères ; un choc violent fait, au contraire, remonter brusquement la résistance, qui se remet ensuite à diminuer. C'est encore une analogie avec la cohération.

L'intensité du courant qui traverse le contact est d'ailleurs trop faible dans ces expériences pour que le phénomène ordinaire de la cohération puisse intervenir.

Quand on opère par des pressions décroissantes, on constate encore que la résistance ne prend pas tout de suite une valeur fixe, mais qu'elle tend vers une valeur limite, en augmentant d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement. Si on diminue encore la pression, la résistance se remet alors à augmenter ; si, au contraire, on augmente la pression, elle se met à diminuer.

Ces phénomènes sont dus non à la déformation, mais à la modification qui se produit, nous l'avons vu, en chaque point de la surface de contact.

II. Quand on fait croître progressivement la pression, la résistance diminue d'abord extrêmement vite, tant que la pression est encore voisine de zéro, puis beaucoup plus lentement. C'est ce qu'on voit sur la courbe de la *fig.* 4, obtenue en portant en abscisses les carrés des intensités dans l'électro-aimant, c'est-à-dire des quantités proportionnelles aux pressions exercées sur le contact, et en ordonnées les résistances du contact.

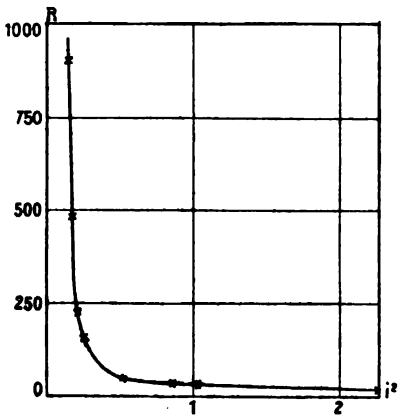


Fig. 4.

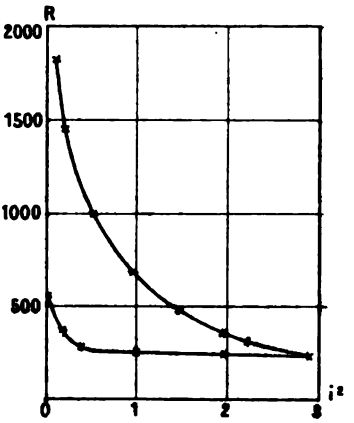


Fig. 5.

La forme de la courbe est d'ailleurs la même si on opère par pressions décroissantes.

Enfin, après avoir fait croître la pression, on peut la diminuer de nouveau. On obtient une deuxième courbe, d'abord presque horizon-

tale quand la pression commence à décroître, et qui est tout entière située au-dessous de la première (*fig.* 5).

Il y a donc dans le phénomène une partie irréversible.

Je me suis assuré d'ailleurs que cette diminution irréversible de résistance ne pouvait tenir ni à une cohération produite par le courant qui sert aux mesures, ni à l'hystérésis du noyau de l'électro-aimant, ni enfin à des frottements ou des flexions qui pourraient se produire dans l'appareil.

La conclusion est que la modification qui se produit dans le contact sous l'influence de la pression ne disparaît pas complètement quand on revient à une pression faible, et qu'*elle a pour effet d'augmenter l'adhérence*. Or Shaw [1] avait déjà constaté que la cohération ordinaire augmente notablement l'adhérence. C'est une analogie de plus entre l'effet de la pression et celui du courant, d'autant plus qu'un choc fait disparaître la diminution de résistance, qui subsiste après qu'on a soumis le contact à de fortes pressions, de même qu'il fait disparaître celle qui subsiste après qu'on l'a soumis à de fortes intensités.

III. Les analogies indiquées déjà entre l'action de la pression et la cohération se précisent par l'étude de la façon dont une de ces actions modifie l'autre.

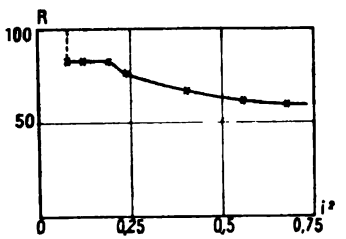


Fig. 6.

1° Si on cohère le contact après avoir commencé de décrire la courbe, il en résulte une diminution brusque de la résistance; si l'on continue alors à augmenter la pression, on constate que *l'augmentation de la pression n'a d'abord aucun effet*. Il semble que l'effet de la cohération a été de devancer celui de l'augmentation de pression, de telle sorte que ce dernier ne recommence à se produire que pour une augmentation de pression suffisante à partir du moment où l'on a cohéré le contact (*fig.* 6).

[1] Shaw, *Philosophical Magazine*, t. I, p. 265; 1901.

Il est d'ailleurs indispensable de faire varier la pression avec les plus grandes précautions ; s'il se produit une augmentation trop brusque ou un à-coup, il peut arriver parfois qu'il se produise une décohération légère avant que la résistance se remette à diminuer.

2° On peut encore cohérer pendant qu'on diminue progressivement la pression ; après la chute due à la cohération, la résistance reste un moment presque constante, comme elle le fait lorsqu'on commence à revenir en arrière après être allé jusqu'à une pression assez grande, et elle se remet ensuite à augmenter *d'une façon continue*. Quand la cohération a été notable, la courbe présente seulement un léger coude, dû à ce que la modification produite par la cohération, plus instable, disparaît la première ; mais, sauf ce coude, qui s'atténue d'ailleurs si la cohération est moins grande et si l'on fait varier la pression très lentement, on ne peut distinguer l'augmentation de résistance due à la décohération de celle qui correspond à la diminution de pression.

En somme, puisque l'action de la pression présente des analogies étroites avec le phénomène de la cohération, on est amené à penser que la modification produite est la même dans les deux cas ; il est naturel de localiser cette modification dans les couches de passage et de supposer qu'elle consiste en une soudure de ces couches par diffusion, de telle sorte que, dans leur épaisseur, les propriétés du métal tendent à devenir les mêmes que dans les couches profondes.

Action du courant sur la résistance de contact. — On fait passer un courant d'intensité variable dans un contact réalisé entre une bille d'acier et un plan d'acier ; la résistance est mesurée par la méthode ordinaire du pont de Wheatstone, et c'est le courant même qui sert à la mesure qui agit sur le cohéreur et fait varier sa résistance, ce qui permet d'en suivre toutes les variations.

Afin de pouvoir régler la pression, le plan d'acier est porté par une tige rigide, la bille par un ressort de flexion, de sorte que, dans la position verticale du ressort, la bille ne touche pas le plan. On établit le contact en inclinant tout l'appareil, le ressort fléchissant simplement par le poids de la bille, et la pression est réglée par l'inclinaison de l'appareil.

I. Quand on établit brusquement à travers le contact un courant d'intensité déterminée, la résistance tombe à une valeur beaucoup plus faible et continue à diminuer peu à peu, d'abord rapidement, puis plus lentement, en paraissant tendre vers une limite : ce sont

les caractères que nous avons déjà constatés avec la pression. On peut suivre cette diminution progressive de résistance pendant plusieurs heures :

1° Quand la résistance est devenue à peu près fixe, après un temps suffisant, si l'on revient à une intensité plus faible, le cohéreur prend une résistance différente, mais parfaitement fixe ; le temps n'a plus aucune influence, et, de plus, la nouvelle résistance est beaucoup plus stable que la grande résistance primitive ; elle est beaucoup moins sensible aux trépidations et aux ondes sonores ;

2° Si on augmente au contraire l'intensité, une fois que la résistance est devenue constante, une nouvelle diminution progressive se produit, faisant tendre la résistance vers une nouvelle limite inférieure à la première ;

3° Si on modifie l'intensité avant que la résistance ait fini de diminuer, sa vitesse de chute augmente si l'intensité augmente, et diminue si l'intensité diminue.

Nous réserverons le nom de *cohération* à la diminution de résistance irréversible qui se produit ainsi progressivement pendant le passage du courant.

II. Si l'on part d'une faible intensité du courant, de sorte que la vitesse de cohération soit très faible, et qu'on augmente cette intensité graduellement, la résistance diminue ; si on revient en arrière, sans avoir trop augmenté l'intensité, la résistance, d'ailleurs très fixe en fonction du temps, augmente quand l'intensité diminue, mais en prenant des valeurs inférieures aux premières.

La différence est due à la cohération qui s'est effectuée pendant le temps nécessaire aux mesures ; en effet, si on va d'une intensité faible à une intensité plus grande en n'établissant cette dernière que pendant un temps très court, la tâche du galvanomètre est lancée du côté de l'échelle qui correspond à une diminution de résistance ; mais, en revenant à l'intensité primitive, on retrouve la résistance primitive, pourvu que le passage du courant maximum ait duré assez peu de temps.

Donc, *antérieurement à toute cohération, la résistance du contact dépend d'une manière réversible de l'intensité du courant qui le traverse ; elle diminue quand l'intensité augmente.*

III. Quand la cohération est terminée pour une certaine intensité, elle l'est aussi pour les intensités plus faibles ; mais la résistance varie avec l'intensité et *d'une manière réversible* ;

1° Si la cohération est faible, la résistance augmente quand l'intensité diminue, gardant ainsi le caractère qu'elle avait avant la cohération ;

2° Si la cohération est grande, la résistance diminue quand l'intensité diminue. Cette dernière variation n'est jamais très grande, et disparaît à peu près pour les cohérations très fortes.

Le passage du premier mode de variation au deuxième se fait d'une façon absolument continue, de sorte que, pour un degré de cohération convenable, la résistance se trouve accidentellement constante quand l'intensité varie.

IV. On peut se demander si le changement de sens du courant qui traverse le cohéreur produit une variation de sa résistance.

1° L'effet est nul toutes les fois que la résistance du cohéreur est fixe par rapport au temps, c'est-à-dire quand il est soumis à des intensités trop faibles pour que la cohération se produise ou bien quand, la cohération ayant été produite par une intensité déterminée, on est revenu à des intensités plus petites ;

2° Quand la résistance du contact est en train de diminuer avec le temps, chaque changement de sens du courant a une action très nette. Les premières inversions produisent toujours une diminution de la résistance du cohéreur, et la vitesse de diminution de la résistance devient beaucoup plus grande ; puis la chute produite par chaque inversion diminue peu à peu, le phénomène s'atténue, et il finit par se produire au contraire, après l'inversion, une légère augmentation, d'ailleurs très lente ; enfin tout effet s'efface quand la cohération est complètement terminée. Exemple :

$i = 8$ milliampères.

Sens du courant	Résistance
+	50,4, diminution lente.
+ interrompu et rétabli.	50,4.
—	Chute rapide à 37.
+	Chute à 34.
—	Augmentation à 36,5, puis diminution à 34,3.
+	Chute lente à 32.
—	Augmentation à 34.
+	32,3 à peu près fixe.

Les signes + et — représentent les deux sens du courant. On voit de plus qu'il peut arriver que, lorsqu'on rétablit un sens du cou-

rant, il se produise déjà une augmentation, tandis que, lorsqu'on passe au sens inverse, il se produit encore une chute de résistance; on dirait que chaque sens du courant agit indépendamment de l'autre.

L'augmentation de résistance qu'on constate vers la fin du phénomène n'est que temporaire; la résistance se remet à diminuer, et, si on lui laisse le temps, elle peut prendre des valeurs plus faibles qu'avant l'inversion.

V. Quant à la façon dont la résistance limite varie en fonction de l'intensité, elle est représentée par la *fig.* 7. La courbe finit par se confondre avec une hyperbole équilatère, c'est-à-dire que la différence de potentiel de part et d'autre du contact devient constante. Guthe et Trowbridge avaient donné à cette différence de potentiel constante le nom de *force électromotrice critique*, et ils ont admis qu'elle ne dépendait que de la nature des métaux. Mais Fisch a montré que la différence de potentiel se remet à croître quand l'intensité devient trop grande, et, d'autre part, j'ai constaté avec l'appareil précédemment décrit que la force électromotrice critique dépend de la pression et diminue quand la pression augmente.

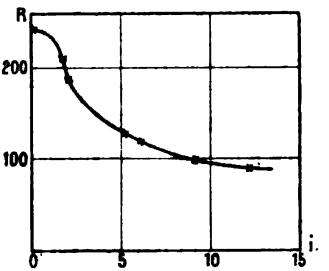


Fig. 7.

VI. Les contacts entre métaux autres que l'acier, dont j'ai eu l'occasion de me servir, présentent tous les caractères précédemment indiqués, avec des différences dans la sensibilité et la stabilité.

Cependant un contact aluminium-acier présente des particularités intéressantes : si on soumet le contact à un courant intense, et si le passage du courant se prolonge, on constate parfois des augmentations de résistance, le système se comportant comme un cohéreur négatif. Toutefois j'ai constaté que le premier effet du courant est toujours l'effet ordinaire de diminution de résistance; mais, s'il se prolonge, il apparaît un nouveau phénomène qui produit une aug-

mentation et qui détruit l'effet du premier. La résistance commence donc par diminuer, puis passe par une valeur minima et réaugmente. L'augmentation paraît due à un phénomène parasite tout à fait distinct de la cohération.

Conséquences relatives à la théorie du cohéreur. — En somme, il paraît certain que le contact entre les deux métaux existe déjà avant la cohération ; ce sont leurs couches de passage qui sont en contact. Or les couches de passage peuvent pénétrer l'une dans l'autre par diffusion de leurs molécules ; une telle diffusion est très rapide dans le cas de deux gaz et aussi dans le cas de deux liquides : deux gouttes de mercure très propre se mélangent brusquement dès qu'elles viennent en contact. Pour deux solides, cette diffusion est gênée par une grande viscosité ; mais elle se produit encore lentement, comme l'ont montré en particulier les expériences de W. Spring sur la soudure des corps par pression.

Le phénomène est facilité considérablement par certaines causes, comme la pression et l'élévation de la température ; il est naturel d'y ajouter aussi le passage d'un courant ; c'est ce qui produit la cohération. Cette explication exige que la conductibilité des couches de passage soit beaucoup plus faible que celle du métal homogène ; les molécules y sont en effet plus écartées, et la conductibilité augmente à mesure que les molécules se rapprochent. Ce point peut être démontré en partant de la théorie cinétique des métaux. Soit n le nombre des corpuscules négatifs libres par unité de volume, corpuscules qui proviennent de la dissociation des molécules et auxquels est due, comme on sait, la conductibilité du métal ; si λ est leur chemin moyen de libre parcours et c leur vitesse moyenne d'agitation thermique, ils prennent sous l'action d'un champ X, pendant la durée de leur libre parcours, une vitesse moyenne :

$$u = \frac{1}{2} X \frac{e}{m} \frac{\lambda}{c}.$$

L'intensité du courant qui en résulte est :

$$i = \frac{1}{2} n \frac{e^2}{m} \frac{\lambda}{c} X,$$

de sorte qu'on a pour la conductibilité du métal :

$$\alpha = \frac{1}{2} n \frac{e^2}{m} \frac{\lambda}{c}.$$

Quand la distance des molécules augmente, à température constante, λ augmente, mais n diminue *beaucoup plus vite;* il diminuerait déjà comme $\frac{1}{\lambda^3}$, si l'on admettait qu'on a le même degré de dissociation corpusculaire, c'est-à-dire que le rapport du nombre de molécules dissociées au nombre total des molécules reste le même ; mais la dissociation corpusculaire diminue de son côté.

Si on a deux milieux de densités ρ et ρ', le rapport $\frac{n'}{n}$ des nombres de corpuscules par unité de volume dans le second milieu et dans le premier est donné par la formule :

$$\frac{n'}{n} = e^{-\frac{W}{RT}},$$

où W est le travail nécessaire pour faire passer un corpuscule du premier milieu dans le second, R la constante des gaz parfaits rapportée à la molécule, et T la température absolue [1]. Mais W est égal à la différence des énergies potentielles du corpuscule dans les deux milieux, lesquelles sont inversement proportionnelles aux pouvoirs inducteurs spécifiques.

D'autre part, le pouvoir inducteur spécifique est de la forme :

$$K = 1 + a\rho,$$

ou, si K est très différent de 1, comme dans les métaux :

$$K = a\rho.$$

Finalement on voit que $\frac{n'}{n}$ sera de la forme :

$$\frac{n'}{n} = e^{-\frac{B}{T}\left(\frac{1}{\rho'} - \frac{1}{\rho}\right)}.$$

La résistance augmentera donc très vite quand la distance des molécules augmente, et on s'explique ainsi les grandes résistances présentées par un contact.

Cette conclusion est conforme aux expériences où l'on peut me-

---

[1] Je dois cette façon d'aborder le problème à M. Langevin, qui a utilisé la même formule dans sa théorie du magnétisme (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. IV, p. 70; 1905). — Pour la démonstration de cette formule, qui n'est qu'une généralisation de celle du nivellement barométrique, voir Boltzmann, *Théorie cinétique*, t. I, p. 127 (traduct. Gallotti).

surer à la même température la conductibilité du même métal ayant des densités différentes :

1° Quand un métal passe de l'état solide à l'état liquide, sa conductibilité change ; elle diminue pour tous les métaux qui augmentent de volume en fondant, et elle augmente pour ceux dont la fusion est accompagnée d'une diminution de volume ;

2° Quand on soumet un fil métallique à une traction, sa conductibilité diminue, tandis qu'elle augmente si on le comprime dans un piézomètre. De même, la conductibilité du mercure augmente quand on le comprime.

Si on calcule la valeur de la constante B de la formule dans le cas de la fusion et dans celui de la compression, on trouve des valeurs du même ordre, quoique plus grandes dans le premier cas ; ce qui n'est pas très surprenant, car la fusion doit produire une modification de structure plus profonde :

	Par fusion		Par compression	
Mercure.....	$B \times 10^{-4} =$	12	$B \times 10^{-4} =$	4
Plomb.....	»	13	»	2,6
Étain.....	»	9	»	0,6
Zinc.....	»	3	»	0,7

3° Je citerai enfin les expériences de Vincent [1], qui ont montré que la conductibilité des couches de passage était beaucoup plus faible que celle du métal homogène.

Il reste à voir comment peut s'expliquer l'action du courant :

1° Quand le courant passe, il se produit une attraction entre les surfaces qui limitent la couche des deux côtés et la séparent du métal homogène ; cette attraction, égale à $\frac{KV^2}{8\pi\varepsilon^2}$ (ε étant l'épaisseur de la couche de transition, K son pouvoir inducteur spécifique et V la différence de potentiel de part et d'autre), peut être très grande, car V est de l'ordre du dixième de volt au moins, K est très grand, et ε très petit. Le passage du courant doit produire le même effet qu'une forte augmentation de pression ;

2° Le passage du courant doit élever très notablement la température des couches superficielles, ce qui facilite beaucoup la diffusion, comme l'a montré W. Spring ;

3° Enfin les ions positifs du métal doivent tendre à se déplacer

(1) Vincent, *Annales de Chimie et de Physique*, t. XIX, p. 421 ; 1900.

dans le sens du champ; ils ont une certaine mobilité, surtout dans les couches de passage, et, comme toutes les molécules sont à leur tour ions par le double jeu de la recombinaison et de la dissociation corpusculaire, il doit se produire un mouvement d'ensemble dans le sens du champ qui facilite la diffusion dans ce sens. Ainsi s'expliquerait simplement la dissymétrie que le changement de sens du courant met en évidence.

Quant à la variation réversible de la résistance avec l'intensité, elle est due à ce que le contact prend une température d'autant plus élevée que le courant est plus intense, sauf au début de la cohération, où l'effet dominant doit être la variation notable de la surface par laquelle peut se faire le passage du courant.

Nouvelle détermination de la masse du décimètre cube d'eau pure;

MÉTHODE DE MM. MACÉ DE LÉPINAY, BENOIT ET BUISSON;

Par M. H. Buisson [1].

I. Le problème de la détermination de la masse du décimètre d'eau pure est de première importance, et cela à un double point de vue. Pour la définition des unités métriques, il est intéressant de savoir quel est l'écart entre le kilogramme et sa définition primitive; la diffusion du système métrique et son adoption par les pays qui n'en font pas encore usage en dépendent.

D'autre part, il est nécessaire de connaître exactement le rapport du litre au décimètre cube. Le volume d'un corps s'obtient en effet au moyen de pesées, et s'exprime alors en litres, volume du kilogramme d'eau pure à 4°, ou bien par des déterminations de longueur, et s'exprime alors en fonction du mètre. Si l'on désigne par M la masse du décimètre d'eau pure, en fonction de l'étalon du kilogramme, le rapport du litre au décimètre cube est $\frac{1}{M}$.

La méthode de mesure de M s'impose naturellement. Un même volume, celui d'un solide géométrique aussi parfait que possible, est

---

[1] Séance du 5 mai 1905.

évalué à l'aide des deux unités, le rapport des deux mesures donne $\frac{1}{M}$.

La mesure du volume, déduite de celle des dimensions linéaires, comporte de grandes causes d'erreur, dues à l'imperfection même du solide qui s'écarte de la forme géométrique parfaite et oblige à de nombreuses mesures, dont on doit faire la moyenne, d'une façon toujours un peu incertaine. De plus, l'erreur relative sur le volume est triple de l'erreur relative moyenne commise dans la mesure des dimensions linéaires. Si l'on veut atteindre une précision du milligramme sur le kilogramme, soit de 10^{-6}, il ne faut pas commettre d'erreur sur les mesures de longueur supérieure à $\frac{1}{3}10^{-6}$, soit, pour une longueur de 6 centimètres, une erreur de $0^{\mu},02$.

C'est pour cette raison que les déterminations obtenues avant ces dix dernières années sont très discordantes, et ne permettent même pas de fixer l'ordre de grandeur de l'erreur qui a pu être commise.

Depuis, des déterminations plus précises ont été faites. Dans celles de M. Guillaume (1), les dimensions sont mesurées par des procédés mécaniques. Dans toutes les autres, des méthodes optiques ont été employées. Ce sont celle de M. Macé de Lépinay (2), utilisant les franges de Talbot à la mesure des épaisseurs ; celle de MM. Fabry, Macé de Lépinay et Pérot (3), à l'aide des franges de superposition ; celle de M. Chappuis (4), avec l'appareil de Michelson, et enfin celle qui fait l'objet du présent mémoire. Toutes les méthodes optiques ont donné des résultats remarquablement concordants.

II. Les déterminations actuelles ont porté sur deux parallélipipèdes de quartz, presque cubiques, de 4 et 5 centimètres d'arête, taillés d'une façon parfaite par M. Jobin. Le quartz présente l'avantage d'une grande dureté qui lui permet d'être très bien taillé, et d'une complète inaltérabilité au contact de l'eau, comme en témoigne la comparaison des pesées avant et après l'immersion dans l'eau, qui se vérifie au centième de milligramme.

Au sortir des mains du constructeur, le cube, après vérification de l'intégrité parfaite de ses arêtes et de ses sommets, est pesé ; soit m

(1) *Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures*, t. XIV.
(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 7e série, t. II, p. 102; 1897.
(3) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 709; 1899.
(4) *Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures*, t. XIV.

sa masse en grammes. On détermine ensuite sa densité par rapport à l'eau par pesées hydrostatiques, opération très délicate et dangereuse pour le cube. S'il se produit un accident causant quelques écailles, la densité moyenne n'en est pas affectée. Connaissant la dilatation de l'eau et celle du quartz, on ramène cette densité à une température déterminée, 0° par exemple. Le quotient $\frac{m}{d_0}$ est le volume du quartz, à 0°, évalué en millilitres.

Pour le cube de 4 centimètres, trois séries indépendantes de mesures ont été faites. Leurs résultats sont les suivants :

$$d_0 = 2{,}650740$$
$$d_0 = 2{,}650736$$
$$d_0 = 2{,}650737.$$

M. Macé de Lépinay avait utilisé antérieurement ce même morceau de quartz, qui a été retaillé depuis. Il avait trouvé alors

$$d = 2{,}650738.$$

La concordance de ces nombres, ne portant pas sur des masses égales, obtenus à des époques différentes par des observateurs et à l'aide de dispositifs différents, est très remarquable. Elle montre, de plus, que l'eau distillée est suffisamment bien définie, et se retrouve identique à elle-même, malgré des procédés de préparation différents. On peut admettre que la moyenne 2,650738 ne comporte pas une erreur supérieure à une ou deux unités du dernier ordre.

Pour le cube de 5 centimètres, on a trouvé :

$$d_0 = 2{,}650663.$$

Il se manifeste ainsi une différence notable entre ces deux échantillons de quartz.

Les masses de ces deux cubes étant respectivement

$$158^{gr},74850 \quad \text{et} \quad 325^{gr},13118,$$

on en déduit que leurs volumes sont :

$$59^{ml},88842 \quad \text{et} \quad 122^{ml},66033.$$

III. Les dimensions géométriques ont été mesurées optiquement suivant la méthode déjà publiée [1], à laquelle je renvoie pour les

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 8e série, t. II, p. 78; 1904.

dispositifs d'expérience. Contrairement à ce qui a lieu dans les méthodes employées par d'autres physiciens, on n'utilise pas d'autres surfaces que celles qui limitent le corps à mesurer. La lumière doit donc le traverser, par suite l'indice intervient. Dans ses premières déterminations, M. Macé de Lépinay le mesurait sur un prisme, tiré du même bloc. Outre que les mesures goniométriques sont insuffisantes pour donner l'indice avec la précision nécessaire, les variations de l'indice d'un point à l'autre du même bloc de quartz ne permettent pas d'utiliser en une région l'indice mesuré à une distance de quelques centimètres de la première. On arrive à éliminer l'indice par l'emploi de deux phénomènes d'interférence indépendants qui fournissent deux équations, dont les inconnues sont l'épaisseur et l'indice.

Ce sont les franges des lames parallèles épaisses, produites par l'interférence des rayons réfléchis sur les deux faces de la lame, avec une différence de marche $2Ne$, et les franges des lames mixtes, interférence d'un rayon qui a traversé la lame avec un autre qui a traversé l'air, différence de marche $(N - \nu)e$ (N, indice du quartz ; ν, indice de l'air).

Toutes ces franges s'observent en lumière homogène. Pour les premières, on fait tomber sur la lame un faisceau convergent, et on reçoit le faisceau réfléchi dans une lunette visant à l'infini. On observe des anneaux circulaires; le diamètre de l'anneau central donne la partie fractionnaire ε de l'ordre d'interférence. On le mesure en faisant tourner la lame autour d'un axe vertical, de façon que les deux bords de l'anneau viennent successivement se superposer au fil vertical d'un réticule.

Les autres s'observent en lumière parallèle, sous l'aspect d'une ligne noire dans l'image élargie par diffraction de la fente d'un collimateur. L'angle dont il faut faire tourner la lame à partir de l'incidence normale, pour amener cette ligne noire au milieu de l'image de la fente, mesure la partie fractionnaire de l'ordre d'interférence, soit ε'.

Si x et y sont les parties entières de ces ordres d'interférence, elles sont liées aux différences de marche par les deux relations :

$$2Ne = (x + \varepsilon)\Lambda$$
$$(N - \nu)e = (y + \varepsilon')\Lambda,$$

Λ étant la longueur d'onde de la radiation employée. On en déduit :

$$2ve = (x - 2y + \varepsilon - 2\varepsilon')\,\Lambda.$$

On voit que $\varepsilon - 2\varepsilon'$ est la partie fractionnaire de l'ordre d'interférence des rayons qui se seraient réfléchis sur les deux faces d'une lame d'air de même épaisseur que la lame de quartz. Ayant cette partie fractionnaire, on en déduit la partie entière par la méthode classique des excédents fractionnaires.

Il est nécessaire d'employer plusieurs radiations suffisamment simples pour donner des interférences à grande différence de marche. On s'adresse à celles du cadmium, fournies par un tube de Michelson, et séparées par un prisme.

Il faut, de plus, avoir déjà une valeur approchée de l'épaisseur à mesurer. Dans le cas du cube de 4 centimètres, cette valeur est obtenue par une mesure au sphéromètre, avec une précision de 1 à 2 μ. L'emploi des trois radiations rouge, verte et bleue du cadmium suffit alors à déterminer sans ambiguïté la partie entière de l'ordre d'interférence.

Pour le cube de 5 centimètres, l'ordre d'interférence atteint dans le cas du bleu 320000. Les rapports des longueurs d'onde, déterminés par MM. Michelson et Benoit pour des ordres d'interférence plus faibles, sont alors insuffisants. En effet, par suite de la complexité de la radiation bleue, le rapport apparent des longueurs d'onde varie à mesure que l'ordre d'interférence augmente, et sa valeur est inconnue. On ne peut alors compter que sur le rouge et le vert, et il faut une mesure approchée plus précise. On l'obtient par un procédé optique. En plaçant sur un plan étalon le cube de 5 centimètres et tout à côté le cube de 4 centimètres plus une lame d'épaisseur connue d'environ 1 centimètre, on a deux épaisseurs très peu différentes. On pose une lame plane sur la surface la plus élevée, et on forme ainsi entre cette lame et l'autre surface une lame mince d'air, dont l'épaisseur, déjà à peu près connue, est évaluée exactement à l'aide des franges des lames minces produites par les radiations de l'arc à mercure. On tient compte des épaisseurs très faibles comprises entre les différentes surfaces, et, toutes les autres épaisseurs étant connues, on en déduit celle du cube de 5 centimètres, avec une approximation de $0^{\mu},1$ à $0^{\mu},2$, qui est alors suffisante pour qu'on puisse appliquer la méthode des excédents fractionnaires aux seules radiations rouge et verte.

Ayant ainsi $2\nu e$, où l'indice de l'air est connu avec une exactitude bien suffisante, on obtient l'épaisseur avec une précision qui dépend de celle avec laquelle on a mesuré les parties fractionnaires. Or ε se mesure à 0,01 près, ε' à environ 0,02; soit 0,05 pour la partie fractionnaire de $2\nu e$, ce qui entraîne une erreur de $0^{\mu},015$ pour l'épaisseur. En fait, les différentes mesures effectuées au même point ne comportent pas d'écarts supérieurs à $0^{\mu},01$. En se rapportant aux équations données plus haut, on peut alors calculer l'indice, en suivant les indications qui ont été données dans le mémoire déjà cité.

Ces mesures, qu'on peut qualifier d'absolues, ne peuvent se faire qu'en des régions de la lame voisines des bords, pour ne pas séparer les deux moitiés du faisceau interférent dans le cas des franges des lames mixtes ; en employant un dispositif quelconque pour séparer les rayons, on allonge leurs parcours et on introduit des causes d'erreur notables. Pour les points à l'intérieur, on fait des mesures sur les anneaux seuls; leurs variations sont dues aux variations d'épaisseur et à celles de l'indice. L'étude de l'indice aux différents points des bords où il a été mesuré permet de connaître avec assez de sûreté ses variations à l'intérieur de la lame. En retranchant l'effet de celles-ci, on obtient les variations d'épaisseur.

Il est nécessaire de connaître la température du quartz à $0^{\circ},01$ près. Il est placé à l'intérieur d'une boîte à double paroi, formant chemise d'eau. Les ouvertures qui permettent le passage de la lumière ne sont ouvertes que pendant les mesures. Un thermomètre étalon est disposé au voisinage immédiat du cube. Tout l'ensemble est à l'intérieur d'une cave à température très constante ; c'est ainsi que les mesures absolues du cube de 5 centimètres, qui ont duré deux mois, ont toutes été faites entre $10^{\circ},5$ et $11^{\circ},5$. La source de lumière, cause d'élévation de température, est placée dans une cave voisine; l'observateur peut la déplacer, tout en ayant l'œil à la lunette pour utiliser telle radiation qu'il désire. On peut passer très rapidement de l'observation des franges à celle des anneaux, par la permutation de deux pièces dans une position bien déterminée.

Une mesure complète ne dure que quelques minutes, de sorte que la température initiale du quartz peut être prise avec sûreté comme température correspondant à la mesure.

Quand l'épaisseur que l'on étudie est perpendiculaire à l'axe du quartz, la lumière doit être polarisée rectilignement; dans la di-

rection de l'axe, on doit prendre de la lumière circulaire pour les franges, de la lumière naturelle pour les anneaux.

IV. *Résultats.* — Pour le cube de 4 centimètres, on a mesuré de façon absolue quatre épaisseurs par couple de faces, en des points situés sur les bords, au voisinage du milieu des faces latérales. On a aussi mesuré les indices. Comme leurs variations étaient très régulières et ne dépassaient pas 2.10^{-6}, on a déterminé les épaisseurs aux autres points par l'étude des anneaux. On a eu ainsi 25 déterminations par couple de faces. Les variations d'épaisseur étant très faibles, leur moyenne s'obtient sans aucune difficulté.

Je donne quelques nombres pour montrer avec quelle perfection les surfaces ont été taillées.

Direction de l'axe, mesures aux bords, au voisinage des milieux des faces latérales :

3cm,9774.30
3 ,9774.27
3 ,9774.30
3 ,9774.26 ;

épaisseur au centre :

3cm,9774.32.

Dans une direction perpendiculaire à l'axe, mêmes positions

3cm,8557.19
3 ,8557.18
3 ,8557.20
3 ,8557.17
3 ,8557.20.

Dans l'autre direction perpendiculaire :

3cm,9052.07
3 ,9052.23
3 ,9052.28
3 ,9052.46
3 ,9052.30.

Dans ce dernier cas, les surfaces ne sont pas tout à fait parallèles : elles font entre elles un angle de 2 secondes.

Toutes ces mesures sont ramenées à 0° et sont déduites uniquement de la radiation rouge du cadmium.

Les épaisseurs moyennes pour chaque couple de faces sont alors :

3cm,9774.30
3 ,8557.19
3 ,9052.27.

Comme on a vérifié que les angles dièdres ne différaient pas d'un angle droit de plus de quelques secondes, on a le volume en faisant le produit des trois épaisseurs moyennes. On trouve :

$$59^{cm3},88998.$$

De la comparaison avec la valeur du volume évalué en millilitres il résulte :

$$M = 999^{gr},974.$$

Pour le cube de 5 centimètres, on avait d'abord mesuré quatre épaisseurs par couple de faces ; mais, comme les variations d'indice étaient assez grandes et atteignaient $5 . 10^{-6}$, on a, de plus, fait quatre autres mesures absolues aux angles. On peut alors interpoler pour avoir l'indice en tous les points de l'intérieur. Pour ces points on n'a fait que cinq mesures par couple de faces, soit en tout 13 déterminations d'épaisseur, dont 8 absolues. Ce nombre a paru suffisant, étant donnée la très bonne taille des surfaces, pour avoir l'épaisseur moyenne.

Pour donner une idée de la précision des mesures, je cite les nombres suivants, qui sont les différentes mesures de l'épaisseur au centre d'un couple de faces, chacune étant déduite de la comparaison des anneaux au centre avec les anneaux observés sur les bords, et des mesures absolues faites en ces mêmes points des bords.

4^{cm},9487.641
4 ,9487.643
4 ,9487.627
4 ,9487.636
4 ,9487.634
4 ,9487.628
4 ,9487.628
4 ,9487.630.

L'écart maximum d'un de ces nombres avec leur moyenne,

$$4^{cm},9487.633,$$

est $0^{\mu},010$. Il mesure évidemment l'erreur possible sur une mesure absolue.

Les épaisseurs moyennes ramenées à 0° sont :

4^{cm},9487.66
4 ,9678.06
4 ,9894.78.

Ces nombres ont été calculés en utilisant les coefficients de dilatation du quartz, donnés par M. Benoit. Or on a constaté que le quartz qui constitue le cube de 5 centimètres se dilate différemment. C'est ainsi que les deux dilatations principales entre 10° et 18° sont par degré et par centimètre :

$$0^{\mu},0720 \quad \text{et} \quad 0^{\mu},1338,$$

au lieu de

$$0^{\mu},0737 \quad \text{et} \quad 0^{\mu},1353.$$

Mais il faut remarquer qu'en utilisant les mêmes coefficients à la réduction à 0° des mesures faites par pesées hydrostatiques et des mesures déduites des dimensions linéaires, l'erreur due à l'inexactitude de la dilatation ne porte que sur la différence des températures auxquelles ces mesures ont été faites. Comme dans les mesures actuelles cette différence de température ne dépasse pas 1°, on conviendra que cette cause d'erreur n'intervient nullement.

Dans ces conditions, le volume à 0° du cube est :

$$122^{cm3},66390.$$

Il en résulte :

$$M = 999^{gr},971.$$

Cette dernière valeur n'est pas tout à fait définitive ; on doit encore procéder à une revision complète de tous les calculs.

Si on l'admet provisoirement, on obtient pour le rapport du litre au décimètre cube, d'après les deux déterminations :

$$1,000026 \quad \text{et} \quad 1,000029,$$

soit, sur le kilogramme, une erreur de + 26 ou + 29 milligrammes.

L'écart entre ces deux valeurs est donc de 3 milligrammes et semble donner une limite de l'erreur qui a pu être commise dans cette détermination.

Les résultats trouvés par les autres méthodes optiques ne diffèrent pas des précédents de plus de quelques milligrammes. La valeur de cette importante constante physique qu'est la masse du décimètre cube d'eau pure est donc actuellement connue avec une précision voisine du millionième.

Les déterminations qui font l'objet de ce mémoire ont été faites au Pavillon de Breteuil, par M. Benoit, pour ce qui concerne les mesures de volume par pesées hydrostatiques; la méthode de

mesure des épaisseurs a été étudiée et appliquée au cube de 4 centimètres par MM. Macé de Lépinay et Buisson, à la Faculté des Sciences de l'Université de Marseille; cette collaboration a été brisée par la mort de M. Macé de Lépinay, et j'ai dû faire faire seul les mesures relatives au cube de 5 centimètres.

Conductibilité des gaz issus d'une flamme;

Par M. Eugène Bloch [1].

1. — On sait [2] qu'il existe un nombre assez grand de cas d'ionisation des gaz dans lesquels les ions ont une mobilité exceptionnellement faible, si on la compare à celle des ions ordinaires produits par exemple par les rayons de Röntgen et les rayons de Becquerel. Ceux-ci ayant une mobilité de l'ordre de 1 centimètre par seconde dans un champ de 1 volt-centimètre, ceux-là ont une mobilité de l'ordre de $0^{mm},01$; de plus, ils condensent, en général, la vapeur d'eau simplement saturante, alors que les ions ordinaires exigent une sursaturation suffisante pour produire la condensation. Le premier exemple d'ions de ce genre a été signalé par M. Townsend [3] dans les gaz de l'électrolyse. J'en ai rencontré beaucoup d'autres en étudiant l'ionisation par le phosphore et les gaz récemment préparés par voie chimique (*loc. cit.*), et j'ai proposé de les appeler ions exceptionnels, par opposition aux ions ordinaires. Récemment M. Langevin en a trouvé un nouvel et intéressant exemple en étudiant simplement la conductibilité propre de l'air atmosphérique [4]. Conformément à sa nomenclature, j'appellerai désormais ces ions particuliers les *gros ions*, par opposition aux *petits ions* ou ions ordinaires. Ces expressions font, en effet, image, en rappelant la différence principale de ces deux espèces d'ions, et, d'autre part, on ne peut plus considérer les nouveaux cas d'ionisation comme exceptionnels. Leur nombre paraît même destiné à s'accroître encore passablement, et l'article

---

(1) Séance du 2 juin 1905.
(2) E. Bloch, *J. de Phys.*, III, p. 913; 1904; — *Ann. Ch. Ph.*, IV, p. 25; 1905.
(3) Townsend, *Phil. Mag.*, XLV, p. 125; 1898.
(4) Langevin, *C. R.*, t. CXL, p. 232; 1905.

actuel a précisément pour objet l'étude d'un nouvel exemple de gros ions, fourni par les gaz issus d'une flamme.

2. — Le fait que les gaz issus d'une flamme renferment des gros ions était loin d'être inattendu, si l'on se reporte aux travaux qui ont déjà été publiés sur ce sujet. On sait depuis fort longtemps, non seulement que les flammes elles-mêmes sont fortement conductrices, mais encore que les gaz qui en sont issus emportent avec eux des ions, et possèdent par suite eux-mêmes une conductibilité très notable. C'est même à propos de cet exemple que Giese (1), dans plusieurs importants mémoires, a pu émettre le premier l'hypothèse de l'ionisation des gaz. De tous les travaux publiés depuis sur ce sujet, je ne retiendrai que l'un des plus récents, celui de M. Mac Clelland (2). Ce physicien place un bec Bunsen ordinaire au-dessous d'une cheminée métallique dans l'axe de laquelle sont fixées des électrodes isolées que l'on peut relier à un électromètre. Les gaz de la flamme montent dans la cheminée, tantôt par l'effet de leur légèreté spécifique (due à leur température élevée), tantôt par l'aspiration d'une trompe à eau. Leur conductibilité et leurs propriétés électriques peuvent ainsi être étudiées à des distances croissantes de la flamme. M. Mac Clelland a mesuré, en particulier, la mobilité des ions des deux signes, et a imaginé, à cette occasion, la méthode dite *des courants gazeux*, qui a reçu depuis tant de perfectionnements et d'applications nouvelles (3). Les résultats qu'il a obtenus peuvent être résumés dans le tableau suivant, extrait de son mémoire :

Température	Mobilité
230°	$2^{mm},3$
160°	2 ,1
105°	0 ,4

On voit qu'à la température la plus basse qui ait pu être atteinte la mobilité des ions était déjà tombée à $0^{mm},4$. Ce résultat, publié peu après les premières mesures de mobilité des ions ordinaires, par MM. J.-J. Thomson et Rutherford, n'a pas attiré grande attention, vraisemblablement à cause du faible degré de précision auquel on pouvait prétendre à cette époque. De plus, la sensibilité des méthodes électrométriques ayant été sans doute insuffisante

(1) Giese, *Wied. Ann.*, t. XVII, p. 1, 236, 319; 1882.
(2) Mac Clelland, *Phil. Mag.*, 5e série, t. XLVI, p. 29; 1898.
(3) Voir, par exemple, E. Bloch, *Ann. Ch. Ph.*, IV, p. 65; 1905.

à ce moment, M. Mac Clelland n'a pas pu ramener les gaz jusqu'à la température ordinaire et voir si l'on accentuait ainsi l'écart qui existait entre ses résultats et ceux de MM. J.-J. Thomson et Rutherford.

A la suite de mes expériences sur les gros ions, il m'a paru vraisemblable que, si les gaz de la flamme étaient ramenés à la température ordinaire, la mobilité des ions baisserait jusque vers une limite qui les ferait classer dans cette nouvelle catégorie, et que l'on pourrait ainsi à la fois accroître et systématiser l'écart qui existe entre les résultats de M. Mac Clelland et ceux de MM. J.-J. Thomson et Rutherford. C'est du reste dans cette idée que M. Langevin et moi avons effectué la mesure du rapport ε dans les gaz issus d'une flamme [1] : ce rapport représente, d'après M. Langevin, le rapport du nombre de recombinaisons au nombre total de collisions entre ions de signes contraires. Si les ions ont effectivement une très faible mobilité, on doit trouver évidemment $\varepsilon = 1$, alors que, pour les petits ions, M. Langevin avait trouvé $\varepsilon = 0,27$. La méthode employée, modification de celle de M. Langevin, est une méthode de courant gazeux, qui m'avait déjà servi pour les ions du phosphore [2], mais qui avait reçu de sérieux perfectionnements : les gaz de la flamme étaient refroidis complètement et la mesure faite par une méthode de zéro au moyen d'un électromètre très sensible. Le résultat fut : $\varepsilon = 0,7$. Ce nombre, beaucoup plus grand que celui qui est relatif aux petits ions (0,27), indique que les collisions sont beaucoup plus souvent suivies de recombinaisons et, par suite, les mobilités bien plus faibles. Cependant le fait que le résultat est encore notablement inférieur à l'unité semble difficile à expliquer, si les mobilités ont la valeur extrêmement faible correspondant aux gros ions ($0^{mm},01$).

La question méritait donc à tous égards d'être reprise, et c'est pour cela que j'ai effectué la mesure directe des mobilités dans les gaz issus d'une flamme dans des conditions expérimentales aussi simples que possible.

3. — La méthode employée est une méthode de courant gazeux : le courant d'air d'une canalisation d'air comprimé passe dans un détendeur, puis dans un robinet à pointeau P (*fig.* 1) qui permet de régler son

---

(1) P. Langevin et E. Bloch, *C. R.*, 14 novembre 1904.

(2) Voir sur tout ce qui est relatif au rapport ε : P. Langevin, *Ann. Ch. Ph.*, t. XXVII; 1903; — E. Bloch, *Ann. Ch. Ph.*, IV, p. 102; 1905.

débit. Il traverse ensuite une colonne de coton C de 20 centimètres de longueur, destinée à arrêter complètement les poussières et les ions qu'il peut renfermer. Puis il arrive au niveau d'une très petite

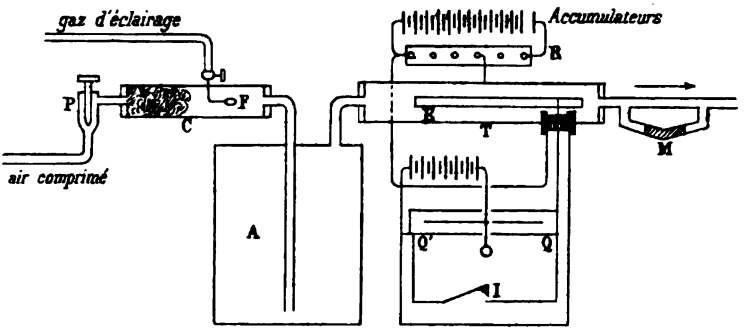


Fig. 1.

flamme de gaz d'éclairage F qui jaillit dans l'axe d'un tube métallique. Il entraîne avec lui les ions produits par cette flamme, et le refroidissement des gaz s'opère extrêmement vite, car la petite flamme bleue utilisée n'a guère que 1 à 2 millimètres de longueur sur 1 millimètre de diamètre. Les gaz parcourent une série de tubes et de récipients métalliques plus ou moins volumineux (tels que le récipient A) avant d'arriver dans le tube cylindrique en laiton T où se font les mesures électriques. Ce tube, de 28 millimètres de diamètre, porte suivant son axe une électrode en laiton E de 1 centimètre de diamètre et 50 centimètres de longueur qu'une tige de soutien, isolée à l'ébonite, permet de relier à l'électromètre. Le bouchon d'ébonite est séparé par un tube métallique, servant de tube de garde et maintenu au potentiel zéro, d'un anneau d'ébonite fixé sur le tube T. On évite ainsi toute espèce de fuite à l'électromètre par l'intermédiaire des supports, et les courants de charge ne peuvent traverser que le gaz. Toute la canalisation qui met en relation l'électrode E avec l'électromètre est, du reste, électrostatiquement protégée.

L'électromètre employé est un électromètre Curie sensible ; son aiguille est chargée en permanence à 90 volts. L'une des paires de quadrants Q' est reliée en permanence à la cage (sol), l'autre Q lui est reliée par l'intermédiaire d'un interrupteur électromagnétique I que l'on

peut actionner à distance, et peut ainsi être isolée au moment de faire une mesure. C'est à cette paire de quadrants qu'est reliée l'électrode E. Le tube est chargé à un potentiel variable au moyen d'une batterie de petits accumulateurs. Afin de faire varier le potentiel dans des proportions bien connues et d'éliminer les inégalités des diverses boîtes d'accumulateurs, la batterie entière est fermée sur une très forte résistance R (1 mégohm), dont une des extrémités est au sol, et dont un point variable est relié au tube T. On constitue ainsi une sorte de potentiomètre, au moyen duquel le potentiel du tube T peut être amené depuis la valeur zéro jusqu'à la force électromotrice totale de la batterie de charge.

Quel que soit le potentiel du tube T, toutes les enveloppes métalliques traversées par le gaz depuis la flamme jusqu'à l'électrode lui sont constamment reliées, et par suite sont portées au même potentiel (il est nécessaire à cet effet de les isoler). Les gaz de la flamme, produits ainsi dans un champ nul, ne sont par la suite soumis à aucun champ avant d'arriver dans le tube de mesure, et la distribution des ions peut y être regardée comme uniforme, surtout si l'on considère que l'on soumet à dessein les gaz à des ressauts assez nombreux destinés à les brasser le mieux possible.

Pour vérifier la constance du débit de gaz et mesurer la valeur de ce débit, les gaz arrivent, au sortir du tube T, dans un tube de verre, qui porte en dérivation un manomètre sensible M du type Töpler à bulle de xylène. Les déviations de cette bulle, dues à la chute de pression du gaz le long du tube de verre, c'est-à-dire à la viscosité de l'air, permettent de connaître le débit à chaque instant, après que l'on a fait un étalonnage convenable au moyen d'un vase de Mariotte[1]. Le débit a toujours été parfaitement constant pendant toute la durée d'une série de mesures (en moyenne 150 centimètres cubes par seconde).

L'expérience étant mise en marche et le régime permanent atteint, on charge le tube T à des potentiels positifs ou négatifs progressivement croissants, de manière à créer des champs correspondant à l'intérieur du condensateur cylindrique TE. Ce champ amène les charges d'un certain signe sur l'électrode E, de sorte que si, à chaque fois, on isole avec l'interrupteur I la paire de quadrants Q, la mesure

---

(1) Voir pour le détail de cette méthode d'étude des débits gazeux : E. Bloch, *Ann. Ch. Ph.*, IV, p. 47; 1905.

faite au chronomètre de la vitesse de déviation de l'électromètre mesure l'intensité du courant qui traverse à ce moment le gaz du condensateur. La courbe donnant les intensités de courant en fonction des potentiels du tube est la courbe dite de saturation. La théorie montre [1] que, si les ions recueillis par l'électromètre ont une mobilité parfaitement définie K, cette courbe doit avoir la forme indiquée sur la *fig.* 2 (courbe I); si l'on construit cette courbe et si l'on détermine l'abscisse V du coude, la mobilité des ions se calcule par la formule :

$$K = \frac{UL\frac{b}{a}}{2\pi l V},$$

dans laquelle a, b et l représentent les rayons des deux armatures du condensateur et la longueur de l'électrode, U le débit du gaz. Si, au contraire, le gaz renferme des ions de mobilités variées, le coude net de la figure doit être remplacé par un raccord à courbure plus ou moins rapidement variable, les abscisses des points à forte courbure permettant encore d'évaluer une mobilité *moyenne* par la même formule [2].

4. — Voici maintenant les résultats des expériences.

Il est facile d'augmenter progressivement la durée du séjour des gaz dans les récipients intermédiaires entre la flamme et le tube de mesure T. Il suffit, pour cela, d'augmenter le volume de ces récipients A, et la connaissance de la durée de séjour se déduira avec une approximation suffisante de celle du débit et du volume total des récipients. J'ai ainsi ajouté peu à peu en série des récipients de plus en plus grands (de 3 à 100 litres), de manière à augmenter la durée du séjour des gaz de quelques secondes à vingt-deux minutes. Or les courbes de saturation ont au début l'aspect de la courbe II (*fig.* 2); peu à peu les courbes se déforment et elles finissent par prendre l'aspect de la courbe III. Les conclusions qu'il faut tirer de là sont évidentes :

Au début, la forme de la courbe se rapproche de la forme théorique I. Il y a donc dans le gaz des ions d'une mobilité assez nettement définie, et, si l'on calcule cette mobilité en se servant de l'abscisse du point H, on trouve des nombres compris entre $0^{mm},5$ et

---

(1) Cf. *Ann. Ch. Ph.*, *loc. cit.*, p. 65.
(2) Langevin, *C. R.*, t. CXL, p. 232; 1905.

1 millimètre. A mesure que la durée du parcours imposé aux gaz va en augmentant, la mobilité devient moins bien définie. Cependant sa valeur moyenne diminue fortement, et elle finit par atteindre des valeurs de l'ordre de $0^{mm},01$. *Il s'est donc formé dans le gaz des gros ions, mais il a fallu pour cela un temps allant jusqu'à quinze ou vingt minutes.*

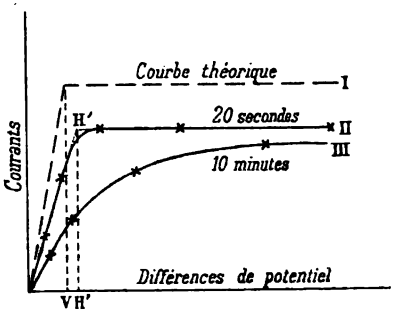


FIG. 2.

Une fois cette limite atteinte, on constate aisément que le courant de saturation correspondant aux ions négatifs est plus intense que celui qui correspond aux ions positifs, et cela dans le rapport de 5 à 4 environ. Le gaz doit donc emporter avec lui un excès de charges négatives. Cette conclusion se vérifie facilement en envoyant les gaz dans un cylindre de laiton rempli de coton et relié à l'électromètre. Ce cylindre, arrêtant toutes les charges présentes dans le gaz, fonctionne comme cylindre de Faraday, et l'électromètre accuse effectivement une charge négative [1].

Les résultats précédents expliquent la valeur 0,7 trouvée pour le rapport ε dans les gaz de la flamme (voir plus haut). Les mesures sur le rapport ε ont en effet été faites dans des conditions telles que les mobilités utilisées étaient voisines de $0^{mm},5$. Il est donc naturel que le rapport du nombre de recombinaisons au nombre total des collisions ait été plus grand que pour les petits ions, sans arriver cependant à égaler tout à fait l'unité. Qu'arriverait-il si, profitant des indications obtenues, on faisait à nouveau la mesure de ε, en opérant cette fois sur des gaz assez *vieux* (15 ou 20 minutes), de manière à avoir des mobilités de l'ordre de $0^{mm},01$? Atteindrait-on la

[1] Ce fait était déjà connu depuis assez longtemps, puisque lord Kelvin l'a signalé dès 1897 (*Nature*, avril 1897).

limite $\varepsilon = 1$ que prévoit la théorie? — Je n'ai pas tenté l'expérience, à cause même de la particularité établie plus haut de l'existence d'une charge négative dans le gaz. Le champ intérieur qui en résulte modifie les conditions théoriques où l'on s'était placé pour faire le calcul conduisant à la connaissance du rapport ε, et l'expérience ne serait plus susceptible d'une interprétation claire.

Au fait maintenant établi de l'existence de gros ions dans les gaz de la flamme suffisamment *vieux*, il faut ajouter ceci : la diminution de la mobilité est assurément due dans les premières secondes à la chute de température; mais, dans les conditions où j'ai opéré, les gaz de la flamme sont entièrement ramenés à la température ordinaire au bout d'un temps qui n'excède pas trente secondes, et cependant à ce moment la faible mobilité limite est loin d'être atteinte. C'est ce qu'un thermomètre quelconque placé dans le tube, et bien isolé thermiquement, permet de vérifier immédiatement. C'est donc à un autre mécanisme qu'au simple refroidissement qu'il faut attribuer la chute progressive et lente de la mobilité qui continue à se produire dans le gaz après les trente premières secondes, et qui, en se prolongeant pendant quinze à vingt minutes, ramène finalement la mobilité à celle qui caractérise en moyenne les gros ions. Il existe dans les ions produits au début une cause d'*instabilité* qui les oblige à accroître peu à peu leur masse jusqu'à un état final d'*équilibre stable*. Cet accroissement de masse, décelé par la décroissance de la mobilité, se fait peut-être par la diffusion vers les centres chargés de la vapeur d'eau contenue dans les gaz de la flamme. Mais, quoi qu'il en soit, il semble certain que la mobilité ne correspond pas à un état stable tant qu'elle n'a pas atteint sa valeur la plus basse. La conclusion la plus importante de ce travail me paraît donc être celle-ci :

Les gaz de la flamme renferment des ions dont la mobilité va en diminuant avec le temps jusqu'à ce qu'elle ait pris (après quinze ou vingt minutes) une valeur finale stable; elle est alors du même ordre que celle des autres gros ions connus.

5. — Je terminerai en rapprochant ce résultat d'autres faits déjà connus :

1° D'après la théorie de la condensation sur les ions développée par M. Langevin, j'avais émis antérieurement l'hypothèse (*loc. cit.*) qu'il ne saurait exister aucun intermédiaire entre les gros ions et les petits ions : ces deux catégories seraient nettement distinctes et

sans liaison continue possible. Cette hypothèse, confirmée jusqu'ici par tous les faits, est d'accord aussi avec le résultat précédent, puisque les mobilités intermédiaires observées dans les gaz de la flamme ne sont pas stables et tendent à diminuer. Mais on rencontre ici un caractère nouveau des gros ions, *c'est la possibilité d'une formation remarquablement lente*. M. Langevin (1) a du reste exposé récemment le résultat d'expériences sur le mode de formation des gros ions qui sont pleinement d'accord avec la même hypothèse.

2° L'expérience bien connue de la condensation dans les jets de vapeur réussit avec les rayons de Röntgen et de Becquerel (petits ions), mais d'une manière beaucoup moins brillante qu'avec le phosphore, les flammes et l'aigrette. De ces trois derniers exemples, les deux premiers comportent, d'après ce qui précède, la présence de gros ions. Les gros ions ne seraient-ils pas, dans tous les cas, la cause principale de la condensation intense dans le jet de vapeur? S'il en est ainsi, les gaz avoisinant une aigrette doivent renfermer des gros ions, et diverses indications permettent déjà de faire cette hypothèse avec quelque vraisemblance. Je me propose de revenir plus tard sur cette question, ainsi que sur d'autres cas de gros ions dont l'existence paraît des plus probables (2).

Sur les phénomènes de l'arc chantant;

Par M. Blondel (3).

De nombreux auteurs ont étudié déjà le phénomène de l'arc chantant, décrit il y a quelques années par M. Duddell (4); mais les conclu-

(1) Langevin, *Séances de la Société française de Physique*, mai 1905.

(2) Par exemple, les gaz avoisinant une étincelle électrique ou un arc électrique.

(3) Séance du 7 juillet 1905.

(4) *Bibliographie de l'arc chantant :* Duddell, *The musical arc* (*Inst. Elect. Eng.*, n° 148 ; 1901 ; — et *The Electrician*, n° 46, pp. 269 et 310 ; 1900 ; et n° 902, 18 septembre 1903). — Simon, *Der singenda Lichtbogen* (*E. T. Z.*, 20 juin 1901). — Paul Janet, *Sur l'arc chantant de Duddell* (*C. R.*, pp. 462 et 821 : 1901). — Ascoli et Manzotti, *Rend. Ac. Lincei*, vol. XI, p. 11 ; 1902. — Tissot, *Congrès de l'Association française à Montauban*, 1902. — Fabry, *Eclairage électrique*, t. X, p. 375 ; 1903. — Wertheim Salomonson, *Académie d'Amsterdam*, 25 octobre 1902. — O.-M. Corbino, *Associazione Elettrotecnica italiana*, 21 mai et 18 octobre 1903. — Meisel, *Physikalische Zeitschrift*, 1er juillet 1903, 1er septembre 1904. — P. Bary, *Ind. électrique*, p. 245 ; 10 juin 1903. — Mazini, *Elettricista*, vol. XI, p. 235 ; 1902. — M. A. Bant, *Nuovi fenomeni circuito Duddell* (*Elettricista*, année XII, 1903) (particulièrement intéressant au point de vue expérimental).

sions auxquelles ils sont arrivés au sujet de la nature de ce phénomène ont été contradictoires, parce que l'examen des régimes apparents est forcément impuissant par lui-même à étudier certains points.

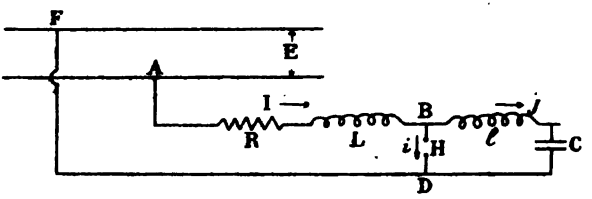


Fig. 1. — Schéma des circuits. H, arc; C, condensateur; R, rhéostat; L et *l*, self-inductions; ABDF, circuit d'alimentation provenant d'un secteur; BCD, circuit d'oscillation.

Pour étudier le mécanisme intime du phénomène, je me suis aidé de la méthode des oscillographes bifilaires que j'ai présentée à l'Académie des Sciences le 6 mars 1893 (¹). J'ai disposé les circuits suivant le schéma bien connu des expériences de Duddell.

L'ensemble de ces circuits (*fig.* 1) était alimenté par un réseau à courant continu à 120 volts, de résistance négligeable, et on a ajouté et retranché dans certains cas une batterie d'accumulateurs pour comparer les résultats obtenus à 55, 120 et 175 volts environ.

Bien que les phénomènes aient présenté à ces différents voltages sensiblement les mêmes caractères généraux, ce qui dispense de les passer tous en revue, il résulte des expériences que l'emploi de tensions supérieures à 110 volts facilite beaucoup la production des régimes les plus intéressants.

Existence de deux régimes-types. — Le premier résultat de l'étude unoscillographique, c'est qu'avec des électrodes en charbons homogènes on peut obtenir deux types très différents d'arcs chantants, l'un continu, l'autre discontinu, et dont les courbes sont bien caractérisées respectivement par les clichés 52 et 21 ci-joints, obtenus tous les deux avec la tension d'alimentation ordinaire voisine de 120 volts, et avec une faible self-induction dans le circuit d'oscillation.

(¹) J'ai fait construire dans ce but, en 1902, par MM. Dobkevitch et Nagel, un oscillographe triple bifilaire permettant d'enregistrer à la fois les courbes des trois variantes. J'ai été assisté pour l'exécution des expériences que je vais rapporter par mes assistants, MM. Boutin et Bethenod, ingénieurs électriciens, qui m'ont prêté le concours le plus efficace.

Le premier type (*fig.* 2), auquel correspond un son soutenu assez pur, et qui est, à proprement parler, l'arc *musical* de Duddell, donne lieu à des courbes de courant dans l'arc et dans le condensateur présentant des formes *continues*, presque sinusoïdales, sans que l'intensité de l'arc descende à zéro ou tout au moins reste nulle pendant un temps appréciable; les variations de la tension aux bornes de l'arc sont contenues entre des limites très rapprochées. Cet arc musical ne se produit que si l'écart entre les charbons est plutôt fort, et au

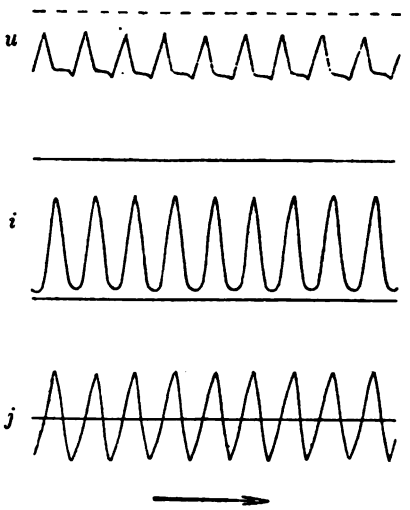


Fig. 2. — Cliché oscillographique n° 52 : courbe du premier type, arc musical, entre 2 charbons homogènes de 5 millimètres de diamètre, écart 4 millimètres, intensité moyenne du courant d'alimentation 2,2 ampères, C = 16 microfarads, L = 0, l = 0,00345 henry, E = 116 volts, fréquence mesurée 540.

Courbe supérieure, tension entre les bornes de l'arc, échelle 0^{mm},17 par volt (horizontale supérieure représentant la tension de la source).

Courbe intermédiaire, courant dans l'arc, échelle 3 millimètres par ampère ; Courbe inférieure, courant du condensateur, échelle 3 millimètres par ampère, échelle des temps 31 mm. pour $\frac{1}{100}$ de seconde.

moins de l'ordre de celui d'un bon arc industriel (3,5 à 4 millimètres ou davantage); on l'obtient le plus facilement dans le cas où le circuit d'alimentation ABDF ne contient qu'une résistance morte ou faiblement inductive, et si le courant n'est pas trop voisin du courant-limite de stabilité.

Le second type (*fig.* 3), auquel correspond un son plus strident ou

sifflant, est un phénomène discontinu caractérisé par ce que le courant de l'arc i présente des points anguleux et des zéros de durée appréciable, pendant lesquels le courant de charge j présente ordinairement des méplats correspondants, tandis que la tension entre les électrodes v subit une double oscillation de grande amplitude, allant souvent au-dessous de zéro ou au-dessus de la force électromotrice de la source d'alimentation.

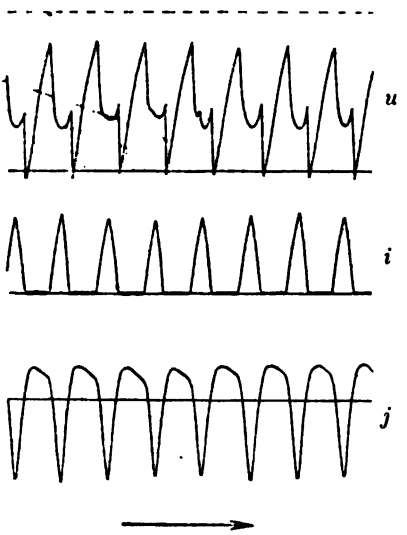


Fig. 3. — Cliché oscillographique n° 21 : courbe du second type, arc sifflant, entre les mêmes charbons, écart $1^{mm},3$, intensité moyenne 1,4 ampère, C = 16 microfarads, L = 0,290, l = 0,0034 henry, E = 126 volts, fréquence mesurée 457.

Ce second type s'obtient surtout quand l'arc est court par rapport au voltage employé (par exemple 0,5 à $1^{mm},5$ à la tension de 110 à 130 volts) et si le courant est faible, et surtout facilement quand on ajoute de la self-induction dans le circuit d'alimentation ; mais on obtient sans self-induction des courbes analogues, pourvu que les autres conditions soient remplies.

La discontinuité du courant dans l'arc, pendant qu'il siffle, a pour effet d'abaisser l'intensité de courant pris à la source d'alimentation.

Analogie du deuxième type avec la décharge fractionnée.—Le second type présente une grande analogie avec le phénomène de la décharge fractionnée d'un courant de haute tension étudié autrefois par Gaugain,

et qu'on obtient en supprimant simplement dans le montage précédent la self-induction du circuit dérivé. Les courbes de la figure 4 donnent un exemple de ce dernier cas. Celles de la *fig.* 3 en diffèrent en ce que la self-induction ralentit la durée de la décharge du condensateur ; celle-ci, au lieu d'une simple décharge instantanée, prend la forme d'un courant temporaire, caractérisé par un palier dans les courbes de tension.

Passage du régime n° 2 au n° 1 et inversement. — Souvent, quand le circuit d'alimentation est peu inductif, on peut passer du régime discontinu au régime continu en faisant simplement grandir l'écart entre les charbons jusqu'à 4 millimètres. En même temps la fréquence des oscillations croît dans une proportion souvent assez grande, sans qu'on ait modifié le circuit oscillant. Par exemple, dans le cliché 52, elle est de 540 périodes, grâce à la suppression des extinctions prolongées, tandis qu'elle était seulement de 457 dans le cliché 21.

Si on écarte davantage encore les charbons, la fréquence s'abaisse de nouveau par suite de la résistance de l'arc et du refroidissement plus grand auquel il est soumis, causes qui ralentissent soit le passage du courant, soit le rallumage.

Explication des deux régimes. — Ces phénomènes peuvent s'expliquer aisément par les propriétés de l'arc entre charbons homogènes au point de vue de stabilité. Soit BCA (*fig.* 5) la courbe théorique de stabilité d'un arc, qui représente la loi de variation de la différence de potentiel quand on diminue son courant, en augmentant la résistance d'alimentation au-delà de la valeur normale (correspondante à la droite d'alimentation DM_1). Par suite du phénomène bien connu des retards de régimes dus à l'échauffement et au refroidissement des électrodes (voir Mme H. Ayrton, *The Electric Arc*), quand on fait varier l'intensité entre deux limites I'_1 et I''_1, le point de régime M décrit non pas à proprement parler une petite droite, mais un petit cycle *onbqa*.

Une semblable variation n'est pas possible sans condensateur, car la variation de courant d'alimentation correspondant aux deux tensions extrêmes et obtenue en menant les deux horizontales *am*, *bq* jusqu'à leur rencontre avec la droite DM''_1 est limitée entre les deux abscisses I' et I''.

Pour que l'oscillation soit possible, il faut que le courant échangé entre l'arc et le condensateur comble la différence entre I''_1 et I'' et I'_1 et I'_1 ; l'existence du régime du premier type, l'arc musical, corres-

pond précisément à ce cas. Le courant d'alimentation peut même subir une oscillation bien plus faible, quand le circuit d'alimentation est un peu inductif.

Une partie du courant d'alimentation sert à compenser les pertes d'énergie par effet Joule, ou autre, dans le circuit oscillant, grâce au fait que la branche de charge *anb* du cycle est au-dessus de la branche de décharge *bqa*; le condensateur reçoit ainsi plus d'énergie qu'il n'a à en restituer.

L'amplitude de l'oscillation *ab* s'établit d'elle-même, de façon que l'aire de la boucle égale l'énergie perdue dans le circuit d'oscillation. L'ionisation des gaz chauds, quand l'écart est grand, empêche d'ailleurs les extinctions brusques, de même que dans l'arc alternatif.

Le second type, régime sifflant, correspond au cas où le régime, moyen M_2, par exemple, devient voisin de la limite de stabilité, sans que les gaz compris entre les électrodes soient notablement ionisés.

Soit *c*KT la partie de cycle décrite pendant que l'intensité diminue à partir d'un maximum I'_2; au point de tangence T de la droite DT qui limite la stabilité, l'arc s'éteint et le voltage remonte jusqu'à ce qu'il atteigne une certaine tension, *v'* par exemple, nécessaire pour le rallumage et qui varie suivant l'écart, les charbons, la durée du refroidissement, etc...; le cycle *dc* se rétablit alors par un parcours descendant *dfc* et ainsi de suite. Ainsi s'expliquent les discontinuités de l'arc sifflant. Plus la force électromotrice d'alimentation E est élevée, plus ce régime est facile à maintenir même avec une intensité plus faible de courant, parce que le rallumage se fait plus facilement par ionisation de la cathode. La même figure montre que, si l'on augmente le courant à l'excès et, par exemple, au régime M_3, la courbe de stabilité tendant à devenir horizontale, peut-être même à remonter (1), sauf dans le cas plus complexe de sifflement par excès de densité de courant, il n'est alors plus possible d'obtenir la charge du condensateur pendant une diminution de courant dans l'arc; par conséquent l'arc cesse de chanter.

Cas d'un arc sifflant lorsque la densité de courant est excessive. — On peut se demander ce qui arrive quand on augmente la densité de courant jusqu'à des valeurs pour lesquelles un arc à courant continu ordinaire devient sifflant; on sait que, dans ce cas, le point ré-

(1) Les parties remontantes des courbes $A\lambda\gamma l'$ sont purement hypothétiques pour des charbons purs; car les expériences de Mme Ayrton n'indiquent jusqu'à présent que des courbes à asymptotes horizontales.

gime quitte la courbe ordinaire de fonctionnement et descend sur une autre courbe plus basse telle que γν (*fig.* 4), de sorte que le cycle décrit pourrait, semble-t-il, devenir inerte et se trouver plus compliqué que nous ne l'avons supposé jusqu'ici. Mais il est facile de reconnaître que tout cycle mixte tel que λγνμ ne peut être décrit spontanément parce que le sifflement commence sous une intensité de courant plus faible qu'il ne cesse ; de sorte que le cycle devrait être

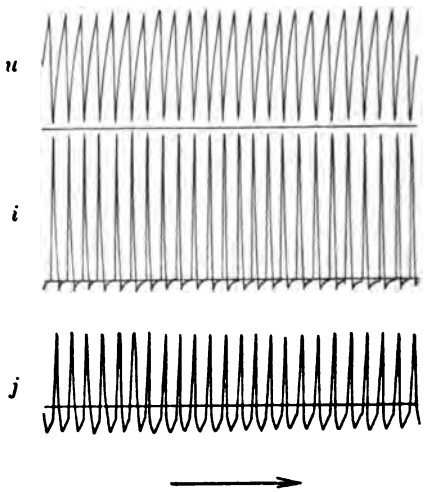


FIG. 4. — Schéma expliquant les phénomènes : BM, A courbe théorique de stabilité de l'arc entre charbons homogènes rapportée aux intensités de courant et aux tensions, aux bornes de l'arc.

décrit dans le sens λγνμ, ce qui est contraire à la théorie précédente. Un cycle mixte est donc impossible, s'il n'y a une extinction pour recharger le condensateur. L'analyse des courbes obtenues avec les mêmes charbons ou avec des charbons un peu plus gros, en poussant l'intensité de courant au-delà de 5 ampères, a confirmé ce résultat [1].

[1] Quand on examine les clichés obtenus pour des intensités moyennes et même pour d'autres plus faibles, on constate aisément qu'à certains moments après l'allumage de l'arc, lorsque l'intensité atteint son maximum, la tension aux bornes de l'arc s'abaisse brusquement, ce qui indique précisément qu'on passe à ce moment du régime d'arc ordinaire au régime d'arc sifflant.

Quand le courant est intense (10 ampères dans les conditions d'emploi actuel),

Dans ces conditions, on constate qu'il est beaucoup plus difficile d'obtenir un son musical, d'autant plus que le charbon est de plus petit diamètre et que l'intensité du courant est plus forte.

Des clichés non reproduits ici [1] montrent qu'on peut encore obtenir un son musical faible vers 5 à 6 ampères quand la self-induc-

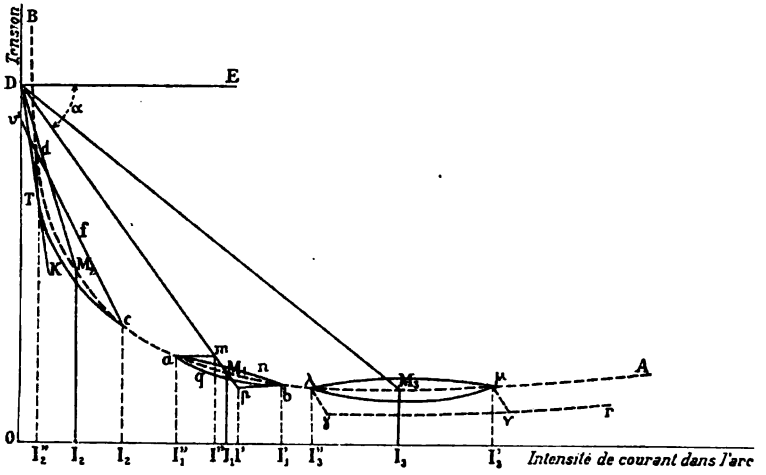


Fig. 5.— Cliché n° 53 : courbe d'une décharge fractionnée entre charbons homogènes de 5 millimètres de diamètre, sans self-induction, force électromotrice de la source 116 volts, écart $1^{mm},2$, capacité 16 microfarads, intensité moyenne du courant 2,7 ampères, échelle des temps 31 millimètres pour $\frac{1}{100}$ de seconde.

Courbe supérieure : tension aux bornes de l'arc, échelle $0^{mm},17$ par volt : courbe intermédiaire : intensité de courant dans l'arc (1 millimètre par ampère ; courbe inférieure : intensité du courant du condensateur, 1 millimètre par ampère).

tion du réseau ne dépasse pas 0,30 h. ni la self-induction du courant oscillant 0,006 h., mais qu'avec 10 ampères la marche est instable, l'arc ne chante pas au-dessus de $1^{mm},5$ environ, écart tout à fait insuffisant pour qu'il y ait un son musical.

---

le régime sifflant commence immédiatement ou presque dès le début de l'allumage et donne lieu à des courbes du genre de celles de l'arc sifflant, avec des pointes très aiguës dans la tension au commencement et à la fin de l'allumage. Les fréquences varient beaucoup dans ces régimes, de sorte que le son paraît confus, et les durées d'extinction très faibles et presque négligeables.

Malgré ces différences quantitatives, il n'y a pas lieu, je crois, de distinguer cette forme de courbe du deuxième type d'arc caractérisé par la discontinuité ; d'autant plus que l'écart entre les charbons est du même ordre que pour ce deuxième type.

[1] Pour plus de détails, voir *l'Éclairage Électrique*, des 15 et 22 juillet 1905.

On peut donc dire que le son pur est impossible ou très difficile à obtenir au-delà de 5 à 6 ampères, et qu'on a généralement un arc sifflant du même type que le type n° 2 défini plus haut.

Circonstances qui accompagnent l'extinction de l'arc, dans le régime n° 2. — Dans tous les clichés présentant une extinction franche de l'arc (annulation de l'intensité du courant dans l'arc pendant un temps appréciable), apparaît, au moment de l'extinction, une dépression anormale de la tension aux bornes, succédant au relèvement progressif normal de la tension de tout arc qui s'éteint. Suivant les cas, cet abaissement se fait sous forme soit d'une oscillation simple

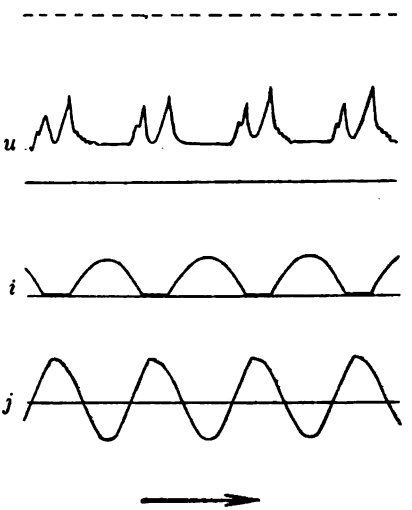


Fig. 6. — Cliché n° 41 : arc sifflant de 0,75 m.m. sans inductance dans le circuit d'alimentation ; source à 129 volts, débit moyen 1,9 ampères ; capacité du circuit d'oscillation, 16 microfarads, inductance 0,034 henry.

Courbe supérieure : tension aux bornes de l'arc (échelle 0mm,17 par volt) ; courbe intermédiaire : intensité de courant dans l'arc (1 millimètre par ampère) ; courbe inférieure : intensité du courant du condensateur (2mm,7 par ampère).

comme on le voit, par exemple, sur la *fig.* 6 (cas d'un circuit d'alimentation non inductif), soit d'une dépression instantanée suivie d'une courbe ascendante remontant plus lentement, comme on le voit, par exemple, sur le cliché 7 (circuit d'alimentation inductif). Ce phénomène intéressant s'explique facilement par l'inertie électrique due à la présence de la self-induction dans le circuit oscillant.

En effet, par suite de cette self-induction, le courant de charge j établi dans la dérivation tend à continuer sa variation d'intensité avec la même vitesse $\frac{dj}{dt}$ qu'avant l'extinction, tandis qu'au moment où l'arc s'éteint soudainement la vitesse de variation $\frac{di}{dt}$ du courant i qui le traversait présente une discontinuité forcée. Bien que la somme $I = i + j$ des deux courants ne varie pas sensiblement au moment précis de l'extinction ni par conséquent la somme des énergies emmagasinées, il existe une différence entre $\frac{dj}{dt}$ et $\frac{dI}{dt}$ qui doit disparaître brusquement; soit $\frac{dI'}{dt}$ la valeur de $\frac{dI}{dt}$ après l'extinction; on doit avoir au moment de l'extinction :

$$L\left(\frac{dI'}{dt} - \frac{dI}{dt}\right)_0 + l\left(\frac{dI'}{dt} - \frac{dj}{dt}\right)_0 = 0.$$

$$U_0' = E - L\left(\frac{dI'}{dt}\right)_0.$$

Ce changement de la loi de variations de U est, dans tous les cas, mis en évidence par un point anguleux sur la courbe du courant d'alimentation, comme on l'a vu plus haut; à partir de cet instant se produit une oscillation presque du circuit-source-condensateur ; mais les conditions sont différentes suivant que le circuit d'alimentation contient ou non de la self-induction.

1° Quand le circuit d'alimentation est non inductif, il ne se produit aucune force électromotrice dans le circuit d'alimentation; la tension entre B et D, que l'arc maintenait constante ou à peu près avant la rupture, se conforme donc, après celle-ci, simplement à la loi d'oscillation de tout l'ensemble du circuit à partir de cette discontinuité

Naturellement, suivant la relation entre la résistance totale du circuit et la self-induction totale, l'oscillation peut être ou non apériodique; le premier cas se présente quand le circuit d'alimentation est seulement formé de résistances ohmiques, car celles-ci sont grandes devant la self-induction l.

Cependant la différence de potentiel U peut subir un crochet vers le bas au début de l'oscillation, comme le montre la figure 7, à cause de la dépression $l\left(\frac{dI}{dt} - \frac{dj}{dt}\right)$ qui se produit dans la self-induc-

tion l, quand le courant se met à décroître, bien que le potentiel au condensateur V croisse. Il n'y a pas de surtensions aux bornes de l'arc, puisque l'oscillations de U ne peut dépasser la valeur E de la tension de la source.

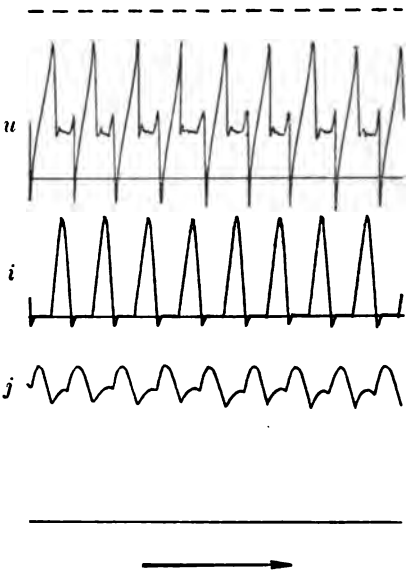


Fig. 7. — Cliché n° 34 : courbe avec circuit d'alimentation légèrement inductif (0,29 henry), arc sifflant de 0,75, source de 128 volts, débitant 1,8 ampère ; circuit oscillant : C = 16 microfarads, l = 0,0034 henry.

Courbe supérieure : tension aux bornes de l'arc, (échelle 0mm,17 par volt); courbe intermédiaire : intensité de courant dans l'arc (2mm,9 par ampère) ; courbe inférieure : intensité du courant d'alimentation (10 millimètres par ampère).

2° Au contraire, si le circuit d'alimentation est lui-même inductif et s'il y a oscillation non amortie, c'est-à-dire si la condition bien connue :

$$\left[\frac{R + r}{2\,(L + l)}\right]^2 < \frac{1}{(L + l)\,c},$$

est réalisée, la tension au condensateur V, et même celle aux bornes de l'arc, peuvent dépasser beaucoup E.

Tout d'abord les conditions initiales de l'oscillation sont modifiées par l'effet de la self-induction L du circuit d'alimentation : la disparition brusque de la variation $\frac{di}{dt}$ (négative arithmétiquement au mo-

ment de l'extinction de l'arc) produit un accroissement brusque de la chute de potentiel inductive du circuit d'alimentation ; par suite une force contre-électromotrice instantanée $-L\left[\left(\frac{dI'}{dt}\right)_0 - \left(\frac{dI}{dt}\right)_0\right]$ apparaît pendant le temps très court que l'arc met à se rompre, tandis que la tension de la source reste constante et la tension aux bornes du condensateur ne change pas d'une manière appréciable (puisqu'aucun échange de courant n'a le temps de se produire); il en résulte que le potentiel, supposé positif à la borne commune des deux selfs, s'abaisse brusquement suivant une loi linéaire le long de chacune des deux bobines de self-induction L et l, de façon à présenter à leur point de jonction son minimum ; tandis qu'avant l'extinction, le potentiel décroissait depuis ce point jusqu'à la borne du condensateur. On conçoit d'ailleurs aisément que, quand la self-induction L est très grande, elle arrête brusquement l'accroissement du courant j, et la force électromotrice induite dans la self l s'annule ou peut même changer de signe momentanément. La *fig.* 8 et d'autres clichés non reproduits ici en donnent d'ailleurs la vérification expérimentale.

Aussitôt après, l'oscillation générale du circuit se produit et tend à relever le voltage U entre B et D bien au-dessus de la valeur E ; il remonte jusqu'à ce qu'il ait atteint la valeur suffisante pour rallumer l'arc et est limité par ce rallumage ; le méplat de la courbe de j est, en réalité, un tronçon de courbe d'oscillation à tangente horizontale ou voisine de la direction horizontale. Tous ces détails du phénomène sont mis clairement en évidence par le cliché n° 46 (*fig.* 8).

L'oscillation périodique amortie (ou plutôt son tronçon réalisé) peut être aisément calculée en fonction des valeurs U_0, V_0, I_0 au moment de l'extinction. Il suffit de poser suivant des formules connues :

$$\alpha = \frac{R + l}{2(L + l)}, \qquad \beta = \sqrt{\frac{1}{(L + l)c} - \alpha^2},$$
$$V = Ae^{-\alpha t} \sin(\beta t - \varphi);$$

A et φ étant deux constantes d'intégration. D'où, en négligeant la résistance :

$$I = c\frac{dV}{dt} = A\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}\, e^{-\alpha t} \cos\left(\beta t - \varphi + \operatorname{arc\,tang}\frac{\alpha}{\beta}\right),$$
$$U = Ae^{-\alpha t} \sin(\beta t - \varphi) + l\frac{dI}{dt}.$$

Le régime final étant $V = E$, $I = o$, tandis que le régime initial est $V = V_0$, $I = j_0$, A et φ sont déterminés par les deux équations de condition :

$$A \sin \varphi = E - V_0 = E - U_0 - l\left(\frac{dj}{dt}\right)_0,$$

$$\frac{\cos\left(\varphi + \operatorname{arc\,tang}\frac{\alpha}{\beta}\right)}{\sin \varphi} = \frac{j}{(E - V_0)\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}.$$

D'où :

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{\beta (E - V_0)}{-j_0 - \alpha (E - V_0)},$$

$$A = \sqrt{(E - V_0)^2 + \left[\frac{j_0 + \alpha c (E - V_0)}{\beta c}\right]^2}.$$

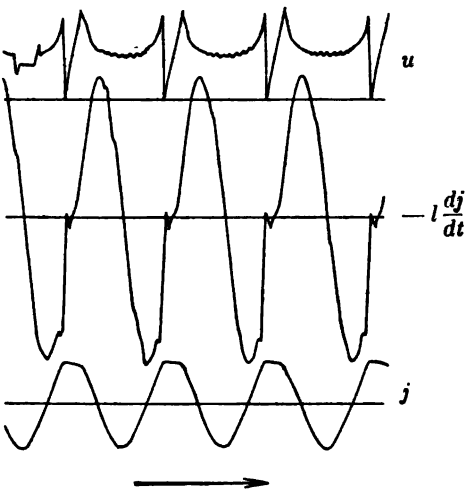


Fig. 8. — Cliché 46 : étude de la force électromotrice dans la self-induction du circuit oscillant. Arc de 1 millimètre alimenté par une source de 125 volts à l'intensité moyenne de 1,8 ampère : self-induction et capacité du circuit oscillant 0,034 henry et 16 microfarads ; self-induction d'alimentation 0,717.

Courbe supérieure : tension de l'arc (1mm,7 par volt) ; courbe intermédiaire : tension dans le self (0mm,20 par volt) ; courbe inférieure : courant du condensateur (3 millimètres par ampère).

L'élongation maxima théorique de V s'obtiendrait en faisant $I = o$. Je n'insiste pas sur ce calcul, parce qu'il est dénué d'intérêt pratique.

Son seul but est de permettre de prévoir l'influence des divers éléments du circuit sur la période β et sur la rapidité d'ascension de la courbe. Ce n'est plus qu'un cas d'application des résultats connus de la théorie des oscillations amorties.

Relation entre l'arc chantant et les décharges oscillantes à haute tension. — Quand la dépression est assez forte pour rendre négative la tension entre B et D, on constate (*fig.* n° 7) un petit bec dans les courbes d'intensité, dans le sens négatif, au début de chaque extinction ; le courant, qui passe à ce moment en arrière, est excessivement faible et dû à l'ionisation résiduelle, qui laisse aux gaz compris entre les électrodes une légère conductibilité, mais non pas à la production d'un arc de sens inverse, qui exige la désagrégation de la cathode. Je me suis proposé d'exagérer ce phénomène de manière que la désagrégation se produise et que la décharge soit franchement oscillante.

Dans ce but, il fallait accroître l'énergie emmagasinée dans le condensateur (1) et espacer suffisamment les décharges pour laisser à chacune le temps de se continuer oscillatoirement avant que recommence le phénomène de charge. Ces deux conditions ont été réalisées en augmentant à la fois la self-induction intercalée dans le circuit d'alimentation, qui a été portée à 7 henrys, et la tension de la source, qu'il a suffi de porter à 170 volts environ pour obtenir de bons résultats (les renversements de courant peuvent être encore plus nets avec un voltage plus élevé). En outre, pour diminuer les effets d'amortissement, qui auraient consommé l'énergie dans le circuit oscillant, on n'a employé dans celui-ci que des bobines de self-induction sans fer et de faible résistance ohmique, et d'inductance peu considérable pour réduire autant que possible la durée d'oscillation du circuit du condensateur. La *fig.* n° 9 donne un exemple caractéristique du résultat satisfaisant ainsi obtenu ; chaque courant de décharge donne lieu à une élongation positive brusque suivie d'une élongation négative plus faible, pendant laquelle l'arc se rallume durant un instant très court (comme l'indique un point d'inflexion situé sur la branche négative de la courbe de tension). Comme le montrent les courbes, le phénomène est irrégulier, le courant de

(1) Bien que celui-ci eût 16 microfarads (nécessaires pour allonger assez la période pour une bonne inscription), tant que la tension ne dépassait pas 120 volts, l'énergie emmagasinée ne dépassait pas $\frac{16}{2} \times \frac{14.400}{10^6} = 0,1152$ joules.

retour étant d'autant mieux accusé que la charge précédente a été plus prolongée et la tension plus élevée au moment de l'allumage, ce qui augmente l'énergie emmagasinée. On notera la forme presque rectiligne de la courbe de potentiel pendant la charge, sur une grande longueur; elle indique que la tension atteinte au moment de l'élongation maxima serait très considérable si le rallumage de l'arc n'ar-

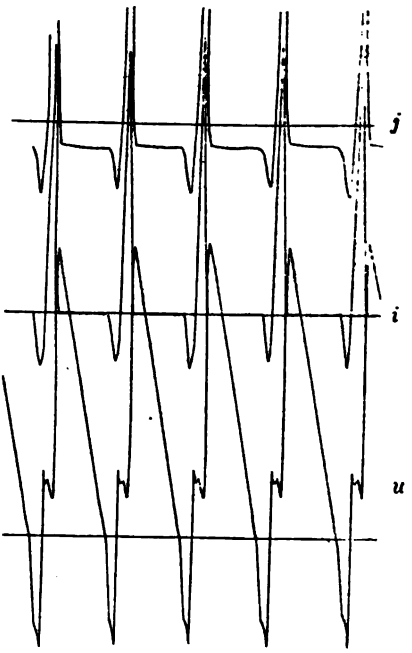


Fig. 9. — Cliché 76 : arc de 3mm,5 avec inversion du courant ; source à 170 volts intensité moyenne 1,5 ampère dans une inductance L = 7 henrys ; circuit oscillant $l = 0{,}0017$ henry et $c = 2$ microfarads.

Courbe supérieure : intensité du condensateur (2 millimètres par ampère) ; courbe intermédiaire : intensité dans l'arc (2 millimètres par ampère) ; courbe inférieure : tension de l'arc (0mm,17 par volt).

rêtait prématurément l'accroissement de la tension. Ce phénomène de décharge oscillante, obtenu pour la première fois, je crois, entre charbons homogènes, constitue un type extrême du régime de l'arc chantant, tout à fait différent de celui étudié par Duddell, et relie l'arc chantant au phénomène des oscillations de haute fréquence. Il montre d'une manière frappante l'analogie qui existe entre le charbon pur et les métaux, au point de vue des arcs qu'ils permettent de

réaliser et donne le droit d'employer le premier comme représentant à basse tension les mêmes effets.

La seule différence entre les courants oscillants obtenus de cette manière et ceux que donnent les éclateurs entre métaux, c'est que, d'une part, ils ne se produisent qu'à des fréquences assez basses (condition nécessaire pour que le phénomène garde sa discontinuité), et que, d'autre part, la résistance propre élevée de l'arc entre charbons entraîne une dissipation rapide de l'énergie qui amortit les oscillations beaucoup plus vite que dans l'arc entre métaux. C'est ce qui explique que l'oscillation s'arrête après la seconde élongation, tandis qu'en haute tension les éclateurs entre métaux donnent lieu à un nombre d'alternances beaucoup plus grand.

Arc chantant entre charbons contenant des substances minérales. — Contrairement à l'opinion admise que le phénomène de l'arc chantant n'est possible qu'entre les charbons homogènes, il a été possible de faire chanter l'arc entre charbons à mèche, grâce à l'addition d'une self-induction dans le circuit d'alimentation. On constate alors qu'il se produit bien dans le circuit d'oscillation un courant alternatif de fréquence élevée, mais que les variations de la différence de potentiel aux bornes de cet arc sont de faible amplitude et que le potentiel ne tombe pas à zéro, comme il le fait d'ordinaire avec les charbons homogènes. En outre, le courant dans l'arc ne s'annule jamais complètement, mais reste toujours légèrement au-dessus du zéro. En outre, les formes sont très instables.

On obtient un régime discontinu analogue à celui des charbons homogènes en employant des intensités de courant très faibles, par exemple un courant de 1 ampère et au dessous, sous 110 volts.

Les extinctions sont plus ou moins longues suivant la capacité et la self-induction mises en jeu. Quand on augmente la self-induction, les pointes de décharges sont moins aigües, la durée de celles-ci plus considérable, et les courbes de tension présentent un palier horizontal plus allongé.

Ces faits s'interprètent facilement de la même manière que pour les charbons homogènes, en remarquant que les charbons à mèches, bien qu'ils donnent un rapport $\frac{dU}{dI} > 1$ sous les régimes ordinairement employés pour l'éclairage, réalisent néanmoins $\frac{dU}{dI} < 1$ sous les régimes très faibles employés dans les présentes expériences,

parce que la caractéristique de stabilité se relève toujours assez rapidement quand le courant décroît en s'approchant de l'extinction.

Avec même composition de circuit, sauf quelques légères variations dans la résistance en série avec la source, et sensiblement même écart, l'arc peut prendre des régimes très différents et des fréquences très variées. Ce fait ne peut s'expliquer que par les conditions thermiques du phénomène, et en particulier par la mauvaise conductibilité des électrodes. Une fois que les points d'émission cathodiques se sont fixés en certains endroits des électrodes, ce qui dépend d'ailleurs des régimes antérieurs, ils prennent, sous l'influence du cycle des échauffements, une certaine loi de variation de température, qui peut se reproduire un certain temps, mais qui prend fin aussitôt que les points de jaillissement de l'arc sur l'une ou l'autre des électrodes se déplacent.

J'ai essayé aussi pour la production de l'arc chantant des charbons minéralisés dans la pâte homogène, afin de savoir si l'on constate, entre les effets des diverses substances minérales ajoutées, les mêmes différences que celles que j'ai signalées antérieurement dans l'arc à courant alternatif[1]. A cet effet, j'ai mis en comparaison des charbons contenant respectivement des substances minérales difficilement ionisables (fluorures alcalino-terreux) et des substances facilement ionisables (silicates alcalins). Il a été impossible de faire chanter l'arc d'une manière stable entre les charbons au silicate de soude et d'en relever des oscillographies, même avec un courant au-dessus de 1 ampère; tandisque les charbons minéralisés au spath-fluor ont donné de très belles courbes d'arc chantant, présentant les mêmes caractères que les arcs chantants entre charbons purs (*fig.* 10). La minéralisation des charbons au moyen de sels alcalino-terreux ne modifie donc pas qualitativement les phénomènes obtenus entre charbons homogènes, tandis que l'addition de substances alcalines entretient dans l'arc, pendant les extinctions, une conductibilité suffisante pour faire disparaître des discontinuités de régime et modifier ainsi complètement le phénomène.

Arc chantant entre cuivre et charbon. — Il n'est pas possible de réaliser l'arc chantant entre cuivre et cuivre aux basses tensions ordinaires, pour le même motif que celui qui empêche la réalisation

---

(1) Cf. Mémoire présenté au Congrès international de Saint-Louis sur *l'arc entre charbons minéralisés*, 1904.

de l'arc à courant alternatif. Comme je l'ai montré en 1901 (¹), le refroidissement trop rapide des électrodes métalliques par conductibilité des tiges empêche le *rallumage par désagrégation cathodique* de se produire après chaque extinction, faute d'une température suffisante de cette cathode, sauf quand elle est maintenue suffisamment chaude pour cette désagrégation par le voisinage d'une électrode de charbon incandescent; il m'a paru intéressant d'essayer de même pour l'arc chantant l'emploi d'une électrode de cuivre en combinaison

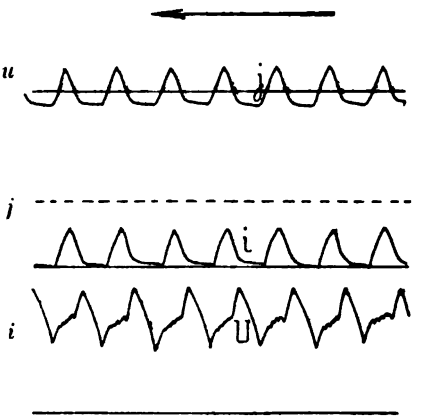


Fig. 10. — Cliché 67 : arc entre charbons à mèche, régime ordinaire. — Intensité moyenne du courant d'alimentation, I = 0,9 ampères ; écart 2mm,5 ; L = 0,427 h., l = 0,00354 h., échelles 0mm,17 par volt, 2 mm. par ampère.
Courbe supérieure : courant du condensateur ; courbe médiane : courant dans l'arc ; courbe inférieure : tension entre les électrodes.

avec une électrode de charbon, et de comparer les effets produits par le cuivre jouant le rôle soit d'anode, soit de cathode. Les tiges de cuivre employées avaient 4 ou 10 millimètres de diamètre suivant les expériences, et on n'a pas constaté de différence suivant l'emploi de l'un ou de l'autre.

L'expérience a démontré qu'on peut réaliser ainsi, dans les deux cas des arcs chantants, même sans ajouter de self-induction sur le circuit d'alimentation. On n'observe pas de différences sensibles entre l'emploi du cuivre comme cathode ou comme anode, tant que l'écart entre les électrodes est assez faible (par exemple de l'ordre

(¹) *Revue générale des Sciences*, 30 juillet 1902, p. 366. Voir aussi sur la même question les travaux postérieurs de Granqvist, Mitkiévicz, Stark et Cassuto, Cooper-Hewitt, etc.

de 1 millimètre) pour que le cuivre, quand il joue le rôle de cathode, puisse se désintégrer et s'ioniser facilement pendant les extinctions grâce à l'augmentation spontanée de la tension entre électrodes. Le chant se produit aussi facilement qu'avec des charbons homogènes, mais avec de plus fortes surtensions. Par exemple, avec 0,132 henry sur le réseau d'alimentation à 125 volts environ, et 0,0085 henry sur le circuit oscillant, le chant peut persister jusqu'à l'intensité de 9 ou 10 ampères, mais il n'est jamais très pur et varie d'une façon irrégulière en hauteur, intensité et qualité.

Quand on essaye d'allonger davantage l'arc, la différence devient plus nette entre le cas du cuivre cathodique et celui du cuivre anodique, en ce que ce dernier seul semble permettre l'emploi de longs arcs chantants; il se prête, par contre, beaucoup moins bien aux inversions de courant pendant l'oscillation, car il faut alors que l'ionisation cathodique se produise sur le cuivre, qui la facilite beaucoup moins que le charbon (par suite de la faible conductibilité du charbon).

Il peut se faire cependant que par suite d'un transport de matière d'une électrode vers l'autre, il se dépose du charbon sur l'électrode de cuivre, et les conditions d'expérience ne sont plus nettes au point de vue du rôle de la cathode; ce qui explique sans doute pourquoi on obtient alors des inversions aussi bien avec le cuivre anode qu'avec le cuivre cathode.

Dans ces conditions, si avec le cuivre anode on augmente suffisamment la self-induction mise en circuit avec la source, comme la vapeur de cuivre en abaissant la résistance de l'arc diminue l'amortissement des oscillations, on voit apparaître de loin en loin une oscillation à 3 ou 4 alternances, comme le montre le cliché 84 (*fig.* 11). A cette triple oscillation du courant, que nous n'avons pu obtenir sous cette tension avec du cuivre cathode, correspondent nettement trois allumages successifs de l'arc, caractérisés sur les courbes de tension par trois tronçons de courbe montrant des arrêts plus ou moins prolongés de la tension.

Ce phénomène qui n'est ici qu'exceptionnel devient au contraire le phénomène normal quand on peut, grâce à l'emploi d'une tension plus élevée, opérer entre deux électrodes de cuivre. On établit ainsi complètement le rattachement du phénomène à celui des décharges oscillantes entre éclateurs en cuivre, tels qu'on les emploie (avec une fréquence beaucoup plus grande, il est vrai), pour la production des

ondes hertziennes. On voit que les oscillations ont une fréquence qui tend à être indépendante complètement du circuit d'alimentation, grâce à la forte réactance de celui-ci, et fonction seulement du circuit oscillant, tandis que la self-induction du circuit d'alimentation règle la rapidité avec laquelle se fait la charge du condensateur, c'est-à-dire l'intervalle entre les groupes de décharges. La présence de la vapeur de cuivre, la faible tension nécessaire à l'entretien de l'*arc au cuivre*, rendent l'amortissement beaucoup plus faible qu'avec l'arc au charbon.

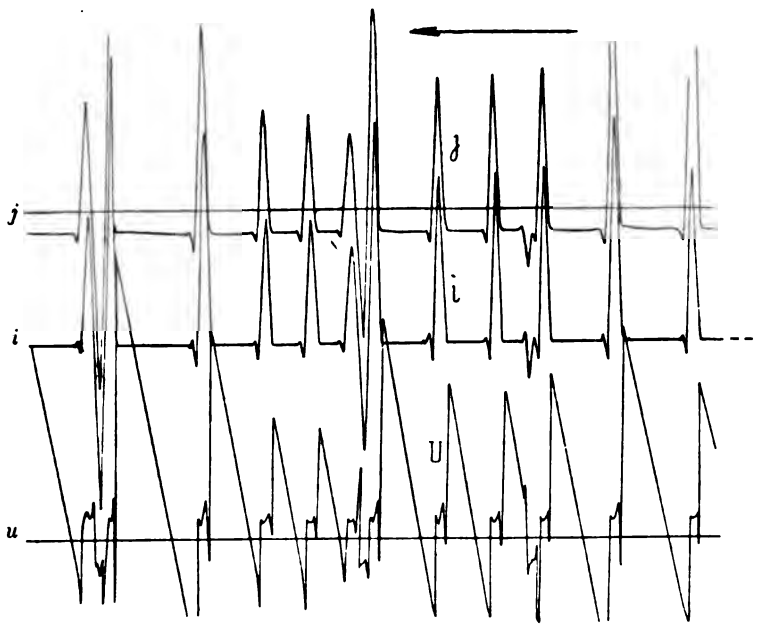


Fig. 11. — Cliché 84 : arc entre une autre anode en cuivre et une cathode en charbon homogène, L = 7 henrys ; l = 0,0017 ; écart 0mm,25. — Intensité I = 1,4 ampères.

Courbe supérieure : courant du condensateur ; courbe médiane : courant de l'arc ; courbe inférieure : tension entre les électrodes ; échelles 0mm.17 par volt ; 2 millimètres par ampère.

Il est plus difficile de faire chanter l'arc au fer qu'au cuivre, mais les phénomènes obtenus sont analogues. A 110 volts, l'arc ne chante guère qu'au moment de s'éteindre et d'une façon irrégulière ; mais sous une tension de 160 volts et au dessus, on obtient, avec ou sans self-induction dans le circuit d'alimentation, des chants en régime

permanent avec le fer servant d'anode ; les courbes sont tout à fait du même genre que celles relatives au cuivre ; mais, à égale force électromotrice d'alimentation, la différence de potentiel aux bornes pendant l'allumage est plus élevée qu'avec le cuivre, et la tendance à l'inversion de la décharge moins prononcée ; on en rencontre cependant quelques exemples quand les arcs sont courts et la fréquence élevée, ou quand l'on emploie une plus forte tension d'alimentation.

Conclusion. — En résumé, cette étude, encore incomplète à mon gré, met principalement en évidence les points nouveaux suivants :

1° Il y a deux types différents d'arcs chantants, que les expérimentateurs ont mélangé jusqu'ici ; l'un continu, l'autre discontinu. Le phénomène continu ne s'obtient, semble-t-il, qu'avec des écarts assez longs pour qu'il y ait des gaz ionisés entre les électrodes ;

2° Le phénomène discontinu est le cas le plus général, car il s'obtient avec les électrodes en charbon ou métalliques, pourvu que, dans le régime chantant lui-même, le courant se rapproche du courant limite sous lequel l'arc s'éteint (dans les conditions d'alimentation réalisées) ;

3° La fréquence d'oscillation de l'arc chantant est essentiellement variable et mal définie ; si, dans le phénomène continu, elle peut être prévue approximativement par la formule de Duddell, par contre, dans le phènomène discontinu, elle n'a plus aucun rapport avec la fréquence propre du circuit oscillant. Les phénomènes s'expliquent par les propriétés connues de l'arc électrique ;

4° La composition du circuit d'alimentation et la tension de la force électromotrice employée jouent un rôle très important. En particulier l'addition d'une suffisante self-induction (ou plus généralement d'une suffisante impédance) dans le circuit d'alimentation permet de réaliser l'inversion du courant dans l'arc à basse tension et de laisser même se produire des oscillations prolongées, tout à fait semblables aux décharges de haute fréquence entre métaux, mais avec le plus fort amortissement.

Les constantes du circuit d'alimentation déterminent les intervalles entre les groupes d'oscillations.

Recherches expérimentales sur la gravitation ;

Par M. V. Crémieu [1].

Les seules expériences faites sur la gravitation ont porté sur la détermination de la constante de Newton. Aucun travail expérimental méthodique n'a été entrepris pour chercher à expliquer la gravitation elle-même.

Rien ne prouve, *à priori*, que la gravitation soit « quelque chose qui se propage » ; et de plus, le fait qu'aucune substance ne fait écran aux forces newtoniennes rend bien difficile la conception d'expériences sur la vitesse de cette propagation problématique.

Seule, l'étude des variations de l'attraction avec le mouvement des corps attirants a été ébauchée et n'a donné aucun résultat net.

Cependant toutes les conceptions actuelles de la physique reposent sur la notion de force s'exerçant à distance, et obéissant à la loi de Newton ou à des lois similaires. Les théories les plus récentes, celles où la masse n'est plus un invariant irréductible, et où l'inertie est considérée comme d'origine purement électromagnétique reposent, comme leurs devancières, sur des actions à distance, sans se préoccuper de la façon dont elles peuvent s'exercer.

On sait d'ailleurs qu'il y a contradiction entre cette conception, qui comporte réversibilité et indestructibilité et, d'autre part, le principe expérimental de la dégradation de l'énergie. Les théories actuelles s'en tirent en invoquant la loi des grands nombres ; la grossièreté de nos sens ne nous permet de percevoir que des effets moyens, pour lesquels la probabilité de réversibilité est infiniment petite ; en sorte que l'irréversibilité qui nous frappe et, par suite, la contradiction qu'elle semble introduire, ne seraient qu'apparente.

Il m'a semblé qu'il ne serait pas impossible de demander à l'expérience si la loi de la nature est bien celle de Newton, avec la réversibilité qu'elle comporte, ou si, au contraire, la contradiction est réelle. Dans ce cas, il faudrait que les phénomènes dans lesquels l'énergie gravifique entre en jeu entraînent, comme tous les autres, une dégradation d'énergie.

C'est ce point que j'ai cherché à vérifier ; voici les remarques qui

---

[1] Séance du 17 novembre 1905.

ont guidé le choix des expériences auxquelles je me suis arrêté.

Processus de la dégradation de l'énergie. — Les phénomènes qui ont pour siège la matière pondérable sont toujours causés par l'évolution, au sein de cette matière, d'une quantité d'énergie d'une forme déterminée : or cette évolution entraîne inévitablement une transformation partielle en une énergie de forme différente, et c'est cette transformation qui provoque la dégradation d'énergie résultant du phénomène considéré.

En d'autres termes, en dehors de la gravitation, on ne connaît jusqu'ici aucun phénomène qui ne mette en jeu qu'une seule forme d'énergie ; les diverses formes d'énergie qu'on voit apparaître sont liées entre elles par des lois d'équivalence, et la diminution d'énergie libre est, pour chaque forme, liée aux diminutions relatives aux autres formes.

La poussée hydrostatique comparée à la gravitation. — Ceci posé, on peut faire la comparaison suivante : considérons les variations de propriétés physiques entre l'état gazeux et l'état liquide, pour une même substance. Nous connaissons la diminution d'énergie libre correspondant au passage du premier au second de ces états. Nous savons d'ailleurs que la gravitation s'exerce dans l'un et l'autre.

De plus, l'ensemble des connaissances physiques nous a imposé l'idée d'un milieu impondérable, remplissant tout l'espace et pénétrant tous les corps ; et, implicitement, tout le monde admet bien que c'est à cet « éther » qu'est due la gravitation elle-même. Enfin les phénomènes électriques et optiques vous ont appris que l'état de l'éther est fonction de l'état de la matière avec laquelle il coexiste.

Nous sommes donc en présence du fait expérimental de l'attraction Newtonienne, sur laquelle nous ne savons rien, dans une situation analogue à celle d'Archimède, vis-à-vis des liquides, après qu'il eut trouvé la loi de la poussée hydrostatique. Ignorant les principes de la mécanique et les lois de la gravitation, il aurait pu interpréter le fait de la poussée exercée par le liquide comme résultant de la tendance de celui-ci à occuper seul l'espace qui lui est offert, chassant de son sein tous les corps hétérogènes. Et, comme nous pour la gravitation, Archimède aurait constaté que l'interposition d'un écran quelconque entre les corps immergés et la surface libre, en apparence surface attirante, ne modifiait en rien les effets de cette pseudo-attraction, la poussée hydrostatique existant ainsi en tous les points des liquides.

Il me semble qu'il n'y a aucune absurdité, *à priori*, à imaginer que l'éther du vide se comporte, par rapport à la matière pondérable d'une façon analogue, mais plus complexe, parce qu'il pénètre les corps.

Cela revient à imaginer l'orientation initiale du système du monde, occupé au début par un chaos d'éther et de matière, vers un état d'équilibre final, qui sera atteint quand l'éther aura réduit à une seule toutes les discontinuités que constituent dans son sein les portions encore isolées de matière pondérable.

Par suite, la quantité d'énergie gravifique libre ira toujours en diminuant, et l'hypothèse qui me guide revient à admettre que cette diminution s'opère d'après les mêmes lois que celles connues, relativement aux autres formes de l'énergie.

On peut en déduire deux ordres de conséquences, vérifiables par l'expérience.

1° *Transformation de l'énergie gravifique.* — En premier lieu, l'évolution au sein de l'éther d'une quantité d'énergie gravifique devra provoquer une transformation partielle en énergie de forme différente, et telle qu'elle entraînera la dégradation voulue par notre hypothèse. Cette énergie, intervenant à la manière habituelle qui est celle prévue par la loi de Lentz, provoquera des réactions qui tendront à s'opposer à l'évolution de l'énergie gravifique.

J'ai tenté autrefois l'expérience sous la forme suivante : Sous le plateau d'une balance très sensible sans couteau (1), on suspendait une sphère équilibrée par des poids convenables. En approchant de cette sphère une très grosse masse de plomb, on obtenait une déviation de quelques millimètres, due à l'attraction newtonienne. Quand l'équilibre était rétabli, un système de déclic très puissant permettait de lancer brusquement vers le bas la grosse masse de plomb. D'ailleurs les appareils étaient installés de telle façon que la projection de cette masse ne communiquait aucune trépidation à la balance.

L'effet attendu était une impulsion de la sphère attirée, dans le sens du mouvement communiqué à la masse attirante.

Les résultats ont été négatifs. Mais les variations en jeu étaient très faibles. Ces expériences seront reprises sous peu avec une balance appropriée et des masses plus fortes.

2° *Dégradation de l'énergie gravifique.* — La seconde conséquence

(1) *J. de Phys.*, juillet 1902.

vérifiable de notre hypothèse, c'est la variation de l'énergie gravifique libre dans des milieux matériels différents.

Quand on passe de l'état gazeux, qui présente pour toutes les substances une grande uniformité de propriétés, à l'état liquide, l'énergie libre sous les formes calorifiques et mécaniques subit une diminution très variable suivant la nature du liquide. L'état de l'éther étant lié à celui de la matière, on peut s'attendre à ce que l'énergie gravifique libre de l'éther varie, quand on passe des gaz aux liquides, et varie aussi d'un liquide à un autre.

J'ai soumis ces deux conséquences aux vérifications expérimentales suivantes :

Expériences sur des gouttes liquides. — On peut obtenir des liquides non miscibles et de densité identique, les autres propriétés de ces liquides étant d'ailleurs très différentes. L'état de l'éther coexistant avec eux sera aussi très différent. Si, au sein d'une grande masse du liquide A, on immerge plusieurs gouttes du liquide B, ces gouttes constitueront pour l'éther qui pénètre le liquide A une discontinuité qu'il tendra à faire disparaître. Les gouttes seront soit chassées vers la surface qui limite le liquide A, soit poussées les unes vers les autres et réunies en une seule goutte.

On sait au contraire que, dans la théorie du potentiel newtonien, les gouttes devraient rester immobiles, la poussée hydrostatique équilibrant exactement l'attraction mutuelle des gouttes.

Or j'ai observé que les gouttes se rapprochent lentement, dans des conditions où les effets capillaires ne peuvent pas intervenir.

Il faut opérer sur un liquide maintenu à une température constante et uniforme, et à l'abri de toute trépidation. Ces conditions sont réalisées dans la cave obscure d'une ferme [1] distante de 2 kilomètres de tout endroit habité, et où j'ai réalisé mes expériences.

La bâtisse est en partie creusée dans le schiste silurien qui forme la base des terres environnantes. La température, parfaitement uniforme, ne varie pas dans cette cave de 0°,05 du jour à la nuit.

Le liquide était un mélange d'eau distillée et d'alcool absolu; les gouttes faites d'huile d'olive épurée.

Le mélange, de densité égale à celle de l'huile, est soigneusement purgé de poussières par des filtrages successifs, puis débarrassé d'air par ébullition sous le vide, à froid.

---

[1] Cette ferme est située aux Ombries, par Le Poujol (Hérault).

Pour l'expérience, on le plaçait dans un cristallisoir cylindrique de 10 centimètres de hauteur, 15 centimètres de diamètre, dont les bords supérieurs rodés peuvent être fermés par une glace transparente plane.

Les gouttes d'huile sont introduites avec un tube capillaire très fin, qu'un dispositif très simple permettait de retirer normalement à la surface du liquide, à l'aide d'un déclic assez brusque pour que la goutte d'huile, retenue par frottement, restât immergée dans le liquide.

La difficulté est de réussir des gouttes parfaitement exemptes de poussière et de bulles d'air; les poussières, du reste, retiennent toujours de petites bulles d'air. Si petites soient celles qui restent, elles suffisent par leur dilatation, sous l'action des variations de la pression atmosphérique, à transformer les bulles en de petits ludions qui sont toujours en mouvement, jusqu'à ce qu'ils viennent se coller à la surface où la capillarité les retient.

Le cristallisoir est protégé par un cylindre métallique contre le rayonnement de l'observateur.

On observait la projection des positions des gouttes dans un plan vertical et dans un plan horizontal. Pour cela, le cylindre métallique, ouvert à sa partie supérieure, portait, de plus, une fente verticale. Sous le cristallisoir, et en face de la fente, se trouvaient deux miroirs plans. Les gouttes jaunes, éclairées par un faisceau de lumière réfléchie, envoyé dans des conditions convenables, se détachaient nettement de la masse du liquide. On repérait leur position sans erreur de parallaxe sensible, grâce aux miroirs, sur un quadrillage tracé sur verre.

Ascension verticale d'une goutte. — Quels que soient les liquides employés, l'égalité absolue de densité n'est jamais obtenue; d'ailleurs, il se produit toujours de légères altérations chimiques qui viennent modifier les densités initiales. Par suite, les gouttes montent ou descendent avec une extrême lenteur.

En particulier, dans le cas des gouttes d'huile, dans un mélange d'eau et d'alcool, le phénomène connu des *larmes du vin fort* amène une augmentation lente de la densité des couches inférieures. Par suite, les gouttes d'huile montent lentement vers la surface; on constate de plus que leur transparence initiale est troublée, petit à petit, par une opalescence grisâtre.

On sera assuré que la masse liquide est en repos parfait, lorsque

l'ascension de la goutte d'huile se fera suivant une verticale.

Dans les conditions où j'ai opéré, on obtenait, dans le cas d'une seule goutte une ascension très sensiblement verticale.

Ascension dans le cas de plusieurs gouttes. — Si l'on introduit deux gouttes en même temps, les phénomènes changent. Il faut noter que la réussite simultanée de deux gouttes est assez difficile à obtenir, et il suffit qu'une seule des gouttes soit ratée, contienne de l'air, ou se scinde au moment du déclic pour que tout soit à refaire.

J'opérais sur des gouttes d'un diamètre variant de 1 à 5 millimètres et formées autant que possible, dans un même plan horizontal, sur un même diamètre du cristallisoir, à 20 ou 30 millimètres des bords. Leur distance initiale était environ de 100 millimètres.

Les lectures faites de deux en deux heures permettaient de suivre les trajectoires des gouttes. J'ai pu ainsi constater que l'ascension se fait suivant des trajectoires à courbure très faible, dirigées de façon à rapprocher les gouttes. Les vitesses de rapprochement sont assez sensiblement entre elles comme l'inverse de la distance des gouttes.

J'ai pu réaliser, de juillet à septembre 1902, six expériences de ce genre. Pour deux d'entre elles, j'ai réussi, de plus, à introduire, au cours de l'expérience commencée avec deux gouttes, une troisième goutte; les trajectoires des deux premières ont été déviées vers cette goutte.

La figure 1 représente le graphique horizontal d'une expérience faite sur des gouttes de diamètre égal à 2 millimètres environ. La durée totale de l'expérience a été de soixante-dix heures.

Les portions aa' et bb' se rapportent à l'attraction entre les deux premières gouttes; $a'a''$, $b'b''$, cc' sont les trajectoires obtenues après l'introduction de la troisième goutte.

L'expérience a été arrêtée par l'arrivée des gouttes à la surface où la capillarité les a rapidement réunies.

Il est certain qu'il y a là un phénomène curieux, pouvant s'interpréter comme un commencement de preuve en faveur de notre hypothèse.

Toutefois les interprétations possibles sont très nombreuses. En particulier, l'opalescence qui apparaît dans les gouttes est assez inquiétante.

J'ai entrepris de répéter cette expérience dans de meilleures conditions.

D'une part, je dois à M. Bouty de disposer d'une grande cuve cubique, à faces parallèles, de 10 litres de capacité, dans laquelle les observations seront plus faciles.

De plus des essais faits en août-septembre 1905 m'ont permis de constater d'abord qu'il est plus facile de former, dans de l'huile, des

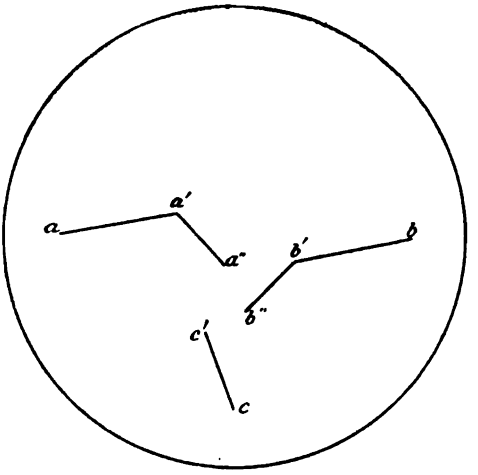


Fig. 1.

gouttes de mélange d'eau et d'alcool que de faire l'opération inverse. En second lieu, qu'en prenant de l'huile d'olive dite huile-vierge, et en faisant les gouttes avec de l'eau distillée et de l'alcool absolu, on ne voit plus apparaître aucun trouble dans les gouttes, même après plusieurs semaines.

L'huile n'étant pas volatile, sa densité demeure constante, et on obtient l'immobilité à peu près complète des gouttes immergées.

Je pense donc pouvoir répéter l'expérience dans des conditions meilleures, et la soumettre de plus à une vérification intéressante que mon regretté maître Potier m'avait suggérée.

Au lieu de former d'abord une seule goutte, puis deux, Potier proposait de former une seule goutte et de suspendre d'abord à l'extérieur de la cuve une sphère métallique, à une distance connue de la goutte. Après avoir observé l'effet de la sphère ainsi placée, effet très vraisemblablement nul, placer la sphère dans l'huile, à la même distance de la goutte que dans l'air.

Un accident a seul retardé de quelques mois ces vérifications.

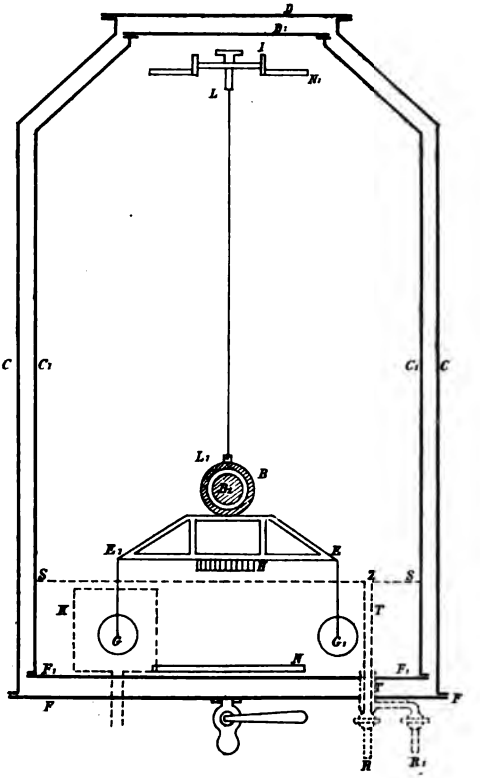

D
D₁
I
N₁
L
C
C₁
C₁
C
L₁
B
E₁
E
S
Z
S
K
T
G
G₁
F₁
F₁
F
F
R
R₁

Fig. 2.

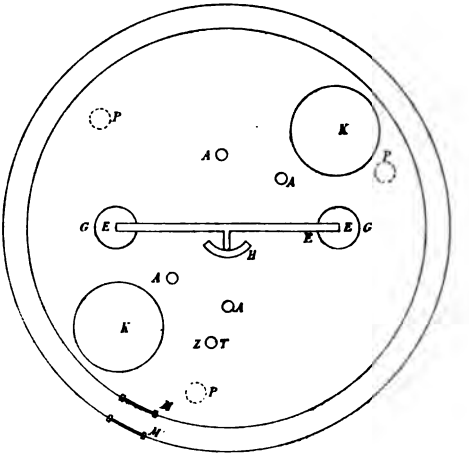

P
K
A
A
P
G
E
E
E
G
H
A
A
K
Z
T
P
M
M'

Fig. 3.

Mais la constance de l'allure générale des courbes obtenues en 1902 m'a engagé à poursuivre, depuis cette époque, la mesure directe de l'attraction newtonienne entre deux solides immergés dans une même masse liquide.

Expérience de Cavendish au sein d'un liquide. — Dans les idées que j'ai exposées plus haut, l'attraction entre deux corps immergés dans deux portions d'un même liquide, séparées par un gaz, serait la même que dans le gaz. Elle serait différente si les deux corps plongeaient dans une même masse de liquide.

C'est pour cette raison que j'ai adopté la forme d'expérience suivante :

Des expérimentateurs, comme MM. Poynting et A. Gray, ayant reconnu l'impossibilité d'obtenir dans un liquide des oscillations régulières, j'ai abordé le problème autrement.

J'ai réalisé une balance de torsion ayant un zéro stable et susceptible, sous l'action des attractions qu'on lui fait subir, de passer sans oscillation d'une position d'équilibre à une autre. La balance est disposée de telle sorte qu'on peut faire des mesures croisées dans l'air et dans un liquide ; on n'a qu'à comparer les déviations obtenues, sans avoir à effectuer des mesures absolues.

Après trois années de recherches préliminaires, j'ai obtenu une enceinte dans laquelle aucun courant liquide ou gazeux ne puisse prendre naissance, et j'y ai installé une balance de torsion qui, au cours de la quatrième année (juin-octobre 1905), m'a fourni les résultats dont l'exposé va suivre.

Voici d'abord une description sommaire des appareils.

La balance de torsion repose sur un double fond FF_1 en fer étamé épais. Ce double fond est supporté par trois colonnes de fonte PPP fixées par un lit de béton de 1 mètre d'épaisseur dans le rocher qui forme le sol de la cave.

Deux cylindres concentriques CC, C_1C_1, de $0^m,60$ et $0^m,70$ de diamètre, et $1^m,20$ de hauteur, pesant chacun environ 100 kilogrammes, viennent, à l'aide de mouffles et d'un pont roulant, reposer sur les plaques FF_1 sur lesquelles on les boulonne. Des plaques boulonnées permettent de fermer la partie supérieure des cylindres et un robinet de remplir d'eau l'intervalle compris entre eux.

La balance de torsion est installée à l'intérieur du second cylindre et placée par suite dans un écran liquide.

Le fil LL_1 qui supporte la balance de torsion est fixé au gonio-

mètre I ; celui-ci repose par l'intermédiaire des plaques NN_1, des colonnes AAAA et de trois vis calantes, sur des plaques crapaudines placées en regard de PPP en même temps que les tirants qui relient entre elles les plaques F et F_1.

Le levier EE, de 402 millimètres de longueur, en aluminium évidé, porte deux sphères en bronze platiné GG, dont les volumes sont rigoureusement égaux, et pesant chacune environ 1.000 grammes.

Le levier porte de plus une bobine B formant avec une bobine fixe B' un électro-dynamomètre permettant de commander la balance après fermeture de la double enveloppe et aussi de mesurer la torsion du fil LL_1 en fonction d'une intensité de courant.

Un miroir H, présentant dix facettes, taillées sur un cylindre de 10 centimètres de diamètre et faisant entre elles des angles de 10°, permet de suivre les mouvements de la balance et d'opérer, sans démonter l'appareil, à des distances différentes entre les sphères mobiles et les masses attirantes.

Celles-ci sont formées des deux cylindres creux KK, en bronze nickelé, dans chacun desquels on peut envoyer, par les variations de niveau d'un réservoir, 20 kilogrammes de mercure.

L'ensemble de ces appareils se trouve dans une salle dont trois parois sont adossées au rocher. La quatrième est fermée par une cloison très épaisse donnant sur une salle où sont installées l'échelle et la lunette d'observation. L'échelle, sur verre, divisée en demi-millimètres, est fixée dans une fenêtre de la cloison, au-dessus d'un solide pilier de briques qui porte la lunette. La distance de l'échelle au miroir est de 413 centimètres, et la lunette permet d'apprécier nettement le dixième de millimètre.

On règle la balance de torsion de façon à faire coïncider la trace du fil L avec le milieu de la distance GG, le milieu de la distance KK et le centre du miroir H. Dans ces conditions, les deux sphères GG viennent rencontrer en même temps les surfaces des cylindres. On lit la division de l'échelle et le numéro de la facette correspondant à ce contact. Alors, connaissant les dimensions des différentes pièces de l'appareil et les angles des facettes H, on peut, par de simples lectures à l'échelle et au goniomètre I, mesurer toutes les distances qui interviendront dans le calcul des déviations, y compris la distance de l'échelle au miroir H.

Pour opérer dans les liquides, on remplit le fond du cylindre intérieur jusqu'au niveau SS à l'aide d'un tube T. La partie centrale de

T est traversée par le tube Z qui forme déversoir. En réglant convenablement l'arrivée du liquide, on produit par ce déversoir une véritable succion de la surface liquide, ce qui permet de la nettoyer facilement.

Les choses sont disposées de telle façon que les fils EE qui supportent les sphères G percent la surface S en des points dont la distance aux autres parties émergeant de S est, au minimum, de 89 millimètres.

La face supérieure des cylindres K est immergée à 15 millimètres au-dessous du niveau SS.

La disposition et la forme de ces appareils résultent de l'étude des conditions de stabilité d'une balance de torsion dans l'air. Il ne suffit pas que l'enveloppe qui protège la balance soit soustraite à toute trépidation, et que la température y soit constante et uniforme.

Il faut encore que cette enveloppe soit suffisamment étanche et rigide pour soustraire l'air qu'elle contient aux *variations de la pression atmosphérique.*

J'ai constaté, en effet, qu'une balance de torsion, placée dans un seul cylindre tel que C_1C_1, *fermé de façon à être étanche pour l'eau*, présentait, après que ses oscillations propres s'étaient amorties, des déplacements de zéro irréguliers, sans période définie, et se rangeant dans le temps suivant une courbe très analogue à celle d'un baromètre enregistreur pendant le même intervalle. De plus, un baromètre enregistreur placé à l'intérieur fournit une courbe identique à celle d'un baromètre laissé à l'air libre.

Ces constatations m'ont amené à adopter une double enveloppe avec couche liquide. Après que la température de cette couche liquide est devenue égale à celle de la salle, on voit les oscillations de la balance devenir parfaitement régulières.

J'ai pu, aidé par M. L. Malcles, suivre des oscillations d'une période de 15 minutes, depuis des élongations de 30° jusqu'à 20 ou 25 secondes, sans constater dans la période ou les décréments, d'autres anomalies que celles *très faibles*, attribuables à la torsion résiduelle du fil de suspension.

D'ailleurs, la balance n'est jamais complètement immobile. Elle conserve toujours des oscillations de quelques secondes d'amplitude; ce qui correspond à quelques dixièmes de millimètre pour le déplacement du centre des sphères mobiles. De plus, le zéro se déplace, avec une période très longue, relativement à la période de

la balance, autour d'une position fixe. Ces déplacements provoquaient, par exemple, une oscillation de 10 à 12 millimètres de l'échelle avec une période d'environ dix heures pour le dernier fil de suspension que j'ai utilisé, la période de la balance étant de 15 minutes 55 secondes.

J'attribue ces déplacements à la détorsion lente des fils dont les génératrices sont toujours inégalement écrouies par l'étirage ou le laminage.

Mais leur petitesse et leur régularité permettent d'effectuer les corrections correspondantes avec une grande exactitude.

Pour les mesures de gravitation, il est nécessaire que la circulation du mercure ne provoque pas d'échauffement appréciable par frottement ou par choc. Une élévation de quelques dixièmes de degré de la température des cylindres K suffit à provoquer de notables perturbations.

Il faut, de plus, en vue de rendre comparables les corrections de torsion résiduelle, lancer le mercure à des phases des oscillations de la balance, choisies de façon à ce que l'amplitude de ces oscillations reste petite par rapport aux déviations à mesurer.

Avec ces précautions, j'ai mesuré, pour huit positions différentes des sphères mobiles, des déviations qui vérifient, dans une première approximation, la loi de l'inverse du carré de la distance, dans des limites de 25 à 10 centimètres entre les centres de G et K, et 15 centimètres à 4 millimètres entre leurs surfaces. Voici un exemple de la concordance des lectures successives et de l'ordre de grandeur des corrections de torsion résiduelle pour une distance de 102 millimètres entre centres :

	Arrivée du mercure		Départ du mercure	
Déviations en millimètres	N° 1	103,2	N° 2	107,6
	3	101,2	4	103,2
	5	102,2	6	106,4
	7	102,3	8	106,6
	9	103	10	106,6
	Moyenne	102,3	Moyenne	106,1

Les calculs complets de ces observations n'ont pu encore être terminés.

Stabilité et mobilité de la balance de torsion immergée. — L'introduction de la couche d'eau SS modifie peu (100 millimètres au maximum sur l'échelle) la position du zéro de la balance, à la condition

que le plan du point d'attache L_1 et des centres de gravité des sphères diffère peu du plan de L_1 et des centres de poussée de l'eau sur les sphères.

Il faut trois ou quatre heures pour que la couche liquide devienne immobile. On constate alors que les petites oscillations qui persistaient dans l'air ont disparu. Les déplacements du zéro sont beaucoup plus lents et de moindre amplitude que dans l'air. La balance est sensiblement apériodique.

L'électrodynamomètre BB_1, tout à fait indispensable ici, permet d'autre part de vérifier que la sensibilité de la balance n'a pas varié.

Mais il faut pour cela une propreté parfaite de la surface SS *et de toutes les surfaces de contact entre le liquide et les parties immergées mobiles* (1). En particulier, il faut qu'aucune bulle d'air ne reste collée contre les surfaces mobiles.

Aussi longtemps que ces conditions se maintiennent, on peut effectuer des mesures de gravitation avec une netteté plus grande que celle obtenue dans l'air ; car l'eau supprime, grâce à sa capacité calorifique, les petites perturbations dues aux échauffements inévitables du mercure en mouvement. Voici un exemple de la concordance des lectures successives :

	Arrivée du mercure		Départ du mercure
N° 1	56,8	N° 2	55,7
3	56,2	4	55,1
5	55,5	6	56
7	55,5	8	55,4

J'ai déterminé, pour quatre distances différentes, les déviations dans l'eau. Elles ont été supérieures à celles que la mesure effectuée dans l'air à la même distance permettait de prévoir. Voici les trois chiffres les plus sûrs.

---

(1) Le fléau dont je me suis servi avait été fait en vue d'appliquer à mes balances l'ingénieuse méthode du flotteur, imaginée par M. Burgess. Le flotteur était en ébonite et plongeait dans du mercure. Il supportait 2.200 grammes, ce qui réduisait à 300 grammes environ le poids supporté par le fil. Mais il se trouve que la balance à flotteur ne peut fonctionner que si toute la surface de contact du mercure flotteur demeure parfaitement propre. Or, au bout de très peu de temps le mercure se ternit au contact de l'ébonite, même polie, ou vernie, ou recouverte d'une couche de cellulose. La propreté de la surface du mercure ne suffit pas.

Il faudrait un flotteur en verre ou en platine.

J'ai dû renoncer pour le moment à cette méthode : la balance à flotteur, libre au début, se collait pour ainsi dire au bout de quarante-huit heures, souvent moins, tout comme les sphères mobiles se collent contre l'eau.

éviation dans l'eau	Déviation dans l'air
104,7	98
56,2	52,4
49,8	46

Je n'ai pu faire un plus grand nombre de déterminations faute de temps.

Du reste, pour reprendre ces expériences et faire les nombreuses vérifications qui s'imposent, il serait indispensable de modifier les appareils sur plusieurs points.

D'abord l'électrodynamomètre est mal adapté à son emploi et demande à être refait.

Mais il y a, de plus, un véritable vice de l'appareil. L'eau SS baigne en effet des parois en fer étamées et vernies ; elle touche aussi le joint de base du cylindre C_1C_1. Or, en dépit de lavages préalables longs et répétés, la couche liquide qu'on laisse ensuite immobile, dissout lentement les vernis, l'oxyde de fer et les matières grasses. Celles-ci se déposent sur les sphères mobiles dont la courbe platinée ne s'oxyde pas, mais devient visqueuse.

En fait, après quelques jours d'immersion, on constate que la balance n'obéit plus qu'à des courants très supérieurs à celui qui mesure sa sensibilité limite. Et quand elle part, elle prend un mouvement brusque, comme si elle se décollait. Les mesures deviennent impossibles. On est obligé de démonter tout l'appareil pour nettoyer la surface des sphères, et de renouveler ensuite l'eau. Ces opérations sont extrêmement longues; elles compromettent, par les secousses inévitables, la constance des fils de suspension.

Il faudrait que la couche liquide ne touche que des parois métalliques inoxydables, ce qui entraînerait de très coûteuses modifications.

Pour le moment je ne conclus donc, de cette dernière expérience, qu'une seule chose :

Il est possible de répéter au sein du liquide l'expérience de Cavendisch, dans des conditions égales, sinon supérieures, à celles réalisées dans l'air.

Quant aux idées que j'ai voulu soumettre à un contrôle expérimental, il est bien certain qu'il serait tout à fait prématuré de vouloir leur trouver une confirmation nette dans les résultats qui précèdent.

Mais ces résultats montrent, il me semble, qu'on peut espérer

trouver quelque chose de nouveau, en opérant dans les liquides.

En terminant, je remplis un devoir agréable, en remerciant tous ceux à qui j'ai eu recours.

D'abord mon maître, M. Bouty, qui n'a cessé de m'aider de toutes les ressources de son expérience et de son laboratoire ; M. H. Poincaré, dont les conseils ont été mon guide le plus constant et le plus sûr. M. Bischoffsein qui a libéralement contribué à l'installation du laboratoire des Ombries, et M. H. Malcles, qui a collaboré, à deux reprises, aux observations et aux montages.

Enfin, tous les constructeurs dont l'habileté, la complaisance et le désintéressement sont les aides précieux de tous les chercheurs : MM. Pellin, Dreyfus frères, Berlemont, la Société des accumulateurs Tudor et la Société du moteur Aster. Je dois à ces deux sociétés d'avoir pu disposer d'une batterie d'accumulateurs et d'un petit groupe électrogène qui en est le complément indispensable.

RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS

FAITES PENDANT L'ANNÉE 1905.

SÉANCE DU 6 JANVIER 1905.

PRÉSIDENCE DE M. D'ARSONVAL.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.
Le procès-verbal de la séance du 18 décembre 1904 est lu et adopté.

M. le PRÉSIDENT annonce la perte douloureuse que la Société vient de faire en la personne de M. *Ramon Maroto,* Professeur à l'Ecole des Arts et d'Industries de Madrid (Espagne).

M. A. GUÉBHARD, pour répondre à l'invitation que lui adresse, par le *Procès-Verbal*, M. Villard, dit qu'en l'absence de toute donnée numérique sur les énergies en jeu, dans des expériences dont il est loin de contester la matérialité, mais seulement l'interprétation, il risquerait fort en voulant les répéter, de se heurter aux résultats contraires, quoique tout aussi authentiques et intéressants, notés par les nombreux prédécesseurs de M. Villard.

Il spécifie qu'en parlant de plaque daguerrienne *simplement iodée* il voulait indiquer seulement que la présence du brome et du chlore (auxquels E. Becquerel imputait les *destructions* attribuées par Lerebours, Fizeau et Foucault, etc., aux rayons rouges), n'était pas plus indispensable dans ces effets que dans ceux de *continuation* observés par Claudet. Celle de l'argent, et *a fortiori* du nitrate d'argent, ne l'est pas davantage; et c'est sur les surfaces les plus diverses, métalliques ou organiques, sèches ou humides, avec toute la gamme des radiations, du bleu au rouge, et avec ou sans les auxiliations chimiques variées, auxquelles en était jadis attribué tout le mérite, qu'ont été obtenus, bien longtemps avant le gélatinobromure, des effets, tantôt de *continuation*, tantôt de *destruction*, presque toujours contradictoires, quoique également exacts, dus uniquement aux différences inappréciées de sommations d'énergie, et point à tel ou tel terme exclusivement.

Parmi les apports d'énergie physique, le voilage *à la lumière diffuse* compte toujours pour une somme énorme, et énormément variable, en sorte qu'appliqué sans mesure il produit les conséquences les plus contraires. Aux surfaces très peu sensibles (papier salé, etc.), il donne le commencement d'ébranlement nécessaire pour vaincre l'inertie de départ et permettre à une excitation, qui par elle-même n'en eût pas été capable dans le même temps, d'opérer la mise en route de l'impression; de même, appliqué *a posteriori* sur une impression déjà partie, il la *continue*, alors même que, suffisamment atténuée par un verre jaune ou rouge, ou par tout autre moyen, il serait incapable de produire à lui seul un noircissement visible. Mais, au contraire, inconsidérément appliqué au gélatinobromure, il dépasse le but, anesthésie la plaque et permet à M. Villard de traiter de légendaire le très réel et très pratique procédé d'accroissement de sensibilité aux faibles excitations, applicable au gélatinobromure comme à toutes les

autres surfaces sensibles, pourvu que le voilage soit prudemment proportionné à la sensibilité. Celle du gélatinobromure ne l'empêche pas plus que les papiers (pourvu qu'on observe ceux-ci par transparence) d'obéir à la loi *absolument générale* de la chute des courbes d'impression par la surexposition suffisante; et si M. Villard persiste à vouloir ignorer le procédé courant de l'effacement des impressions au grand soleil, les analyses chimiques de M. Lüppo-Cramer sur les modifications du bromure d'argent insolé, l'édifieront sur la nullité spécifique du rôle particulier du rouge.

Parmi les énergies chimiques, celle de l'azotate d'argent est certainement une des plus intenses et son renfort paraîtra d'autant plus appréciable qu'il s'ajoutera à d'autres actions plus faibles; mais si réellement les rayons jaunes ne pouvaient se passer de ce concours, ne serait-ce donc pas que la vertu *continuatrice* ne leur est nullement spécifique, ne leur appartient point en propre? Aussi bien le nitrate se passe-t-il d'eux pour produire, à la dose d'une seule goutte ajoutée à un bain de développement impuissant à faire monter une image, la brusque ascension de celle-ci (*continuation* bien caractérisée) et presque aussitôt son complet retournement, les noirs passant au blanc et les blancs passant au noir : destruction et continuation simultanées qu'il semble plutôt justifié d'appeler *inversion*.

Les expériences de M. Guébhard ont montré qu'il suffisait d'accroître par le temps, même sans accroître l'intensité spécifique, la somme d'énergie chimique empruntée au révélateur pour obtenir toujours l'inversion. Mais comment reconnaître le rôle propre de chaque facteur si on ne les dissocie pas avec le plus grand soin? L'usage des cuvettes verticales rend très facile le développement simultané d'un grand nombre de plaques, dans des conditions toujours identiques de compositon et de durée. La substitution à la vague *lumière diffuse* de sources lumineuses étalonnées s'impose absolument pour la graduation des impressions, qu'il y aura grand intérêt à faire par échelons, en réservant toujours, comme témoin, une bande non impressionnée, même dans les essais de superposition orthogonale des effets. Opérant sur pellicules pour éviter les perturbations dites de *halo*, M. Guébhard a déjà vérifié nettement l'identité, dans la loi commune, des actions photographiques réciproques de la lumière et des rayons Rœntgen. Il compte être en mesure, pour la prochaine séance, de fournir une première réponse au point d'interrogation qui terminait sa précédente communication.

M. P. Villard complète les indications déjà données au sujet des expériences de continuation et de destruction.

1° Papier salé pour noircissement direct (plus sensible que l'albuminé). Exposition préalable en lumière blanche comprise entre le dixième du temps nécessaire pour obtenir un noircissement à peine visible et une limite supérieure *ad libitum* (pratiquement il est sans intérêt de dépasser dix fois le temps en question). On posera, par exemple, de 10 secondes à 15 minutes, à 25^{cm} d'une lampe Nernst de 60 bougies. Une minute de pose convient très bien. Pour la continuation, exposer le papier en plein soleil sous un ou deux verres jaunes et un verre vert, pendant au moins 4 heures (limite supérieure *ad libitum*). Dans un spectroscope à deux prismes (fente de 1^{mm} à 2^{mm}, lampe Nernst de 60 bougies, lentilles de 25^{mm}), la continuation est visible après 12 heures; il convient de prolonger l'expérience pendant 50 à 100 heures. Recommencer après suppression de l'azotate d'argent.

Pour la destruction, avec une exposition préalable de 50 à 100 secondes devant la lampe Nernst, il faut au moins 24 heures pour que le phénomène apparaisse. Au soleil, sous verres rouge foncé et jaune, il faut une dizaine d'heures. La destruction est d'autant plus lente que l'exposition préalable a été plus longue (ce serait le contraire pour l'inversion par solarisation). Pas de développement pour ces deux expériences.

Si l'on veut faire intervenir le développement, choisir les poses préalables courtes pour avoir une continuation faible. Aucune indication spéciale pour le développement à l'acide gallique. Avec l'hydroquinone ou la pyrocatéchine, diluer et bromurer le bain, laver le papier avant de développer.

2° Plaques au gélatinochlorure ou gélatinobromure à grain *très fin*. Exposition préalable suffisante pour obtenir un noircissement visible. Plonger la plaque dans un bain d'azotate d'argent à 1 ou 2 pour 1000, exposer au jour sous verre jaune; la continuation a lieu en 1 heure : elle est toujours faible.

3° Plaques au gélatinochlorure (expériences de destruction). Exposition préalable normale (indiquée par le fabricant) ou mieux notablement moindre. Exposition subséquente au soleil sous verres jaune et rouge pendant quelques heures (d'autant plus longue que la pose préalable a été plus forte). Dans le spectroscope sus-indiqué exposition de 4 à 100 heures suivant la pose préalable (mettre un verre jaune devant la fente). Développement alcalin ordinaire approprié à ces plaques.

4° Gélatinobromure. Exposition préalable courte (il est toujours facile de sous-exposer); inutile d'essayer la destruction sous verres rouges au soleil. Au spectroscope exposition de 1 à 24 heures (verre jaune et verre rouge devant la fente). Développement ordinaire.

Avec les rayons X : pose préalable normale pour radiographie. Destruction au spectroscope comme ci-dessus ou sous quatre feuilles de papier noir (papier des boîtes Jougla) devant un bec Auer (4 à 12 heures).

5° Écrans au platinocyanure, 15 à 30 minutes d'exposition aux rayons X. Quelques heures de soleil détruisent cette impression.

Dans toutes ces expériences il convient de réserver une région non impressionnée et une région non soumise aux actions continuatrices ou destructrices. De bons clichés ou des caches en papier ou métal découpé conviennent parfaitement.

Calorimètre de Bunsen employé pour diverses expériences de cours. — M. V. Crémieu présente un calorimètre de Bunsen, modifié en vue de le rendre plus maniable pour les expériences de cours.

En premier lieu, les enveloppes protectrices ordinaires, très encombrantes, ont été remplacées par un cylindre de Dewar. Sous un très faible volume, ce cylindre est assez efficace pour permettre de conserver le manchon de glace du calorimètre, pendant 3 jours.

En second lieu, le tube capillaire indicateur, dont la projection est difficile et ne permet pas de mesures exactes, a été coupé en deux parties; entre ces deux parties on interpose une petite cuve à faces parallèles, remplie d'eau. Les extrémités capillaires pleines de mercure aboutissent ainsi dans un liquide transparent. Toute variation thermique au sein du calorimètre s'accompagnera d'une chute de gouttes de mercure par l'une ou l'autre des extrémités des tubes immergés dans l'eau.

Le réglage est rendu très facile, par le robinet de M. Villard pour un des côtés, et par un robinet fixé à la partie inférieure de la cuve à eau, pour l'autre côté du tube capillaire.

On projette les extrémités du tube capillaire. La projection est très facile et très nette. Elle permet de plus de faire, au cours, des mesures assez précises. Il suffit en effet de compter une fois pour toutes le nombre de gouttes de mercure qui tombent pour une variation thermique de 1^{Cal}.

La mesure d'une quantité de chaleur reviendra alors à compter un nombre de gouttes, ce qui est facile.

M. Crémieu indique ensuite comment, au cours de M. Bouty, il a appliqué le calorimètre ainsi modifié à deux expériences, qu'on n'avait pas encore réalisées publiquement, d'une manière précise. Ce sont :

1° La mesure de l'équivalent mécanique de la chaleur, par une méthode dérivée de celle de M. Miculescu;

2° L'expérience de Joule sur la détente des gaz dans le vide.

Modifications aux trompes à mercure, par M. G. Berlemont. — 1° Dans les modèles de trompes à remontage automatique du mercure par la trompe à eau, suivant le réglage de la rentrée d'air, le mercure se trouvant brassé dans l'air conservait des molécules d'air qui étaient rappelées par le vide de la trompe et limitaient ainsi le vide puisqu'elles se renouvelaient continuellement. Pour éviter ces bulles d'air, M. Berlemont a adapté à la trompe, sur les indications de M. Debierne, un type de purgeur sans robinet permettant d'éliminer complètement toutes traces d'air. Ce purgeur peut s'adapter à tout appareil de son modèle sans autre complication qu'un réglage de rentrée d'air; il est complètement indépendant de la trompe à mercure même.

2° Un inconvénient des trompes à mercure qui fonctionnent fréquemment est la casse des tubes à l'endroit où le mercure vient frapper en coup de marteau lorsque le vide est déjà avancé, cet inconvénient étant grave, parce que cet accident se produit généralement à la fin d'une expérience et oblige ainsi non seulement à recommencer, mais à réparer une trompe. Pour éviter cette casse, M. Berlemont soude entre deux tubes de verre capillaire un tube de platine de $0^m,20$ de long à la hauteur où se produit le choc ; de cette façon, tout accident de casse est éliminé. Une trompe montée ainsi fonctionne depuis trois mois, une moyenne de 8 à 12 heures par jour, sans qu'il y ait de tube cassé.

Lumière oxy-acétylénique de la Compagnie française de l'acétylène dissous; présentée par M. d'Arsonval. — La haute température produite par le chalumeau oxy-acétylénique avait de suite fait penser à l'utiliser à la production de la lumière par incandescence, mais on fut vite arrêté par la fusibilité des matières habituellement employées dans ce genre d'éclairage. La chaux, la magnésie sont creusées en quelques minutes par le jet du chalumeau.

On essaya d'obvier à cet inconvénient en animant le bâton de chaux d'un mouvement de rotation, mais outre de la complication du chalumeau la solution cherchée n'était pas atteinte, car, sous l'influence de la chaleur, la chaux se fend et, lorsque le jet de flamme tombe dans cette fente, l'intensité lumineuse varie considérablement; les impuretés contenues dans la chaux agissent de la même manière.

La vraie solution était donc de trouver une matière résistant à cette haute température. En mélangeant certaines terres rares et en leur faisant subir un traitement approprié, la Compagnie francaise de l'Acétylène dissous a obtenu cette matière.

Moulées sous forme de pastilles de 15^{mm} de diamètre environ elles permettent, avec un chalumeau consommant 50^l d'acétylène à l'heure, d'obtenir une intensité lumineuse d'environ 1500 bougies.

Nouveau procédé de fabrication de l'oxygène comprimé au moyen du générateur autocompresseur de la Compagnie française de l'acétylène dissous; présenté par M. d'Arsonval. — Ce procédé permet d'obtenir directement de l'oxygène sous pression, sans grandes manipulations et ne nécessite pas l'emploi d'une pompe de compression.

L'oxygène se trouve produit par la combustion d'agglomérés se faisant dans l'intérieur d'un réservoir étanche. L'oxygène se comprime de lui-même au moment de sa production. Ces agglomérés se composent d'un mélange de chlorate de potasse avec une substance inerte et une proportion

très faible d'un corps combustible, la chaleur dégagée par ce corps en brûlant étant suffisante pour décomposer complètement tout le chlorate de potasse et mettre l'oxygène en liberté. La matière inerte sert à ralentir la décomposition.

Ces agglomérés se présentent sous la forme de petits cylindres de 30^{mm} de diamètre et 55^{mm} de longueur, ils dégagent 18^{l} environ d'oxygène et leur combustion dure 2 minutes, ils sont inaltérables à l'air.

L'appareil servant à brûler ces agglomérés est désigné sous le nom de *générateur autocompresseur d'oxygène;* il se compose d'un corps cylindrique en acier éprouvé à une forte pression; au centre se trouve un tube destiné à recevoir les agglomérés et qui se termine par une tubulure sur laquelle se monte un couvercle serré par un étrier pour assurer l'étanchéité; à côté de cette tubulure se trouve le robinet servant à la prise du gaz.

Pour charger l'appareil : mettre le nombre d'agglomérés nécessaire dans le tube perforé qui accompagne l'appareil, allumer celui du bas au moyen d'une bougie ou de la flamme d'un bec de gaz; une fois en combustion, introduire le tube perforé dans l'appareil et refermer celui-ci en serrant bien l'étrier. La combustion se propage et l'oxygène dégagé se comprime dans le cylindre à mesure qu'il se produit; la pression peut atteindre 20 atmosphères si l'on a mis la charge complète d'agglomérés.

Une fois tout l'oxygène consommé, défaire l'étrier et retirer le tube perforé, faire tomber les agglomérés brûlés en secouant le tube, l'appareil est de nouveau prêt à être rechargé.

Ce générateur permet donc de préparer de l'oxygène à un instant quelconque et de s'en servir au moment opportun.

Les générateurs autocompresseurs se font en plusieurs grandeurs :

Le type n° 1, pour 4 agglomérés, 70^{l} par charge; le type n° 2, pour 8 agglomérés, 140^{l}; le type industriel, pouvant produire 2^{m^3} à l'heure.

Nouveaux brûleurs de laboratoire et leur application au chauffage à température élevée ; par M. Georges Méker. — Ces brûleurs tendent à réaliser le principe de brûler aussi complètement que possible une quantité de gaz maxima dans un volume de flamme minima.

Les formes et dimensions de ces brûleurs ont été déterminées expérimentalement de façon à obtenir un mélange intime du gaz et de l'air, contenant une quantité d'air suffisante pour que la flamme obtenue produise un maximum d'effet calorifique. La pièce la plus caractéristique du système est un dispositif cellulaire, comparable à un nid d'abeilles dont les cellules seraient de section carrée, fermant le brûleur à sa partie supérieure, et traversé par le mélange gazeux immédiatement avant son inflammation. La flamme obtenue est homogène et très chaude; on doit l'utiliser à partir de quelques millimètres de sa base. Les résultats obtenus sont comparables à ceux du chalumeau ordinaire, la consommation de gaz étant cependant beaucoup diminuée. Sous forme de brûleur à sodium ils permettent d'obtenir des flammes très riches en rayons jaunes. Leur adaptation à l'éclairage fournit aussi d'excellents résultats.

Les mêmes brûleurs disposés pour employer l'air comprimé conduisent a des résultats nouveaux. Suivant la pression de l'air employé, on peut brûler dans le même volume de flamme une quantité plus ou moins grande de gaz et obtenir des températures plus ou moins élevées. Avec de l'air à 100^{g} par centimètre cube, on arrive à la fusion du nickel (1470°) en creuset. Avec de l'air sous 2^{kg}, on arrive en creuset à des températures voisines de 1700°, qui n'ont pu encore être déterminées. On arrive aussi à la fusion directe du platine en masses dans des fours en chaux, avec de l'air à une pression de 2^{kg} à 3^{kg}.

RAPPORT DE LA COMMISSION DES COMPTES

SUR L'EXERCICE 1902-1903.

MESSIEURS,

Le compte de l'Exercice clos le 30 novembre dernier comprend les articles suivants :

Recettes.

		fr
En caisse au 1er décembre 1902		1767,81
	fr	
Cotisations arriérées	888,00	7688,00
» 1903	6800,00	
Entrées		90,00
Souscriptions perpétuelles		2250,00
Intérêts du capital		2297,22
Vente des publications de la Société		543,80
Subvention ministérielle		240,00
Don d'un anonyme		2000,00
Don Guébhard		300,00
Don Nogué		300,00
TOTAL DES RECETTES		17476,83

Dépenses.

	fr
Loyer du siège social	600,00
Traitement de l'agent et gratification	2800,00
Abonnements et reliures	744,60
Indemnité pour le service de la Bibliothèque	300,00
Bibliothèque circulante	89,10
Frais de bureau; étrennes	662,25
Distribution du *Bulletin* et des *Ordres du jour*	1607,90
Recouvrement des cotisations	208,40
Frais d'expériences	89,25
Séance de Pâques	1571,55
Gravure du *Bulletin*	486,75
Impressions Gauthier-Villars	2355,70
» Deslis	1656,75
Recueil d'expériences	283,85
Divers	540,30
TOTAL DES DÉPENSES	13993,40
D'où résulte un excédent de recettes, en caisse au 1er décembre 1903, de	3483,43

Situation.

La situation de la Société au 30 novembre 1903 se résume ainsi :

Actif.

	fr
162 obligations Midi, Est et Ouest achetées 67277fr,25 et valant au 30 novembre 1903	74021,25
En caisse au 30 novembre 1903	3483,43
TOTAL DE L'ACTIF IMMÉDIATEMENT RÉALISABLE	77504,68

Sur la valeur des obligations ci-dessus, une somme de 57700 francs égale, comme on le verra plus loin, au montant des souscriptions perpétuelles, correspond au placement obligatoire prévu aux Statuts (articles III et XIV) pour l'emploi des fonds provenant du rachat des cotisations annuelles.

Passif.

Néant.

Actif non immédiatement réalisable.

Indépendamment des titres déposés en banque et qui constituent son avoir immédiatement réalisable, la Société possède, en dépôt chez M. Gauthier-Villars, un grand nombre de volumes qui augmentent sensiblement son avoir. En voici le relevé :

Coulomb.....	563	3493 volumes.
Ampère I.....	620	
» II.....	754	
Pendule I.....	737	
» II.....	819	
Constantes I.....	740	2459 volumes.
» II.....	820	
» III.....	899	

Soit 5952 volumes portés..... pour Mémoire.
Cotisations à recouvrer, évaluées à..... 500,00

Statistique.

Au 1er décembre 1902.....		968 Membres.
Reçus en 1903.....		46
TOTAL.....		1014
A déduire :		
Décédés.....	9	22
Démissionnaires ou rayés.....	13	
Membres au 1er décembre 1903.....		992

savoir :

439 à Paris,
355 en province,
198 à l'étranger,
992

Les Membres perpétuels sont au nombre de 301, savoir :

	fr		fr
275 (dont 49 décédés) ayant versé...	200,	soit.....	55000,00
9 (dont 1 décédé) » ...	150,	»	1350,00
10 (dont 1 décédé) » ...	100,	»	1000,00
7 » ...	50,	»	350,00
301			57700,00

La Commission a constaté l'ordre et la régularité des écritures tenues par M. le Trésorier; elle vous propose, Messieurs, d'approuver les comptes

ci-dessus exposés, et elle vous demande de vouloir bien adresser à M. de la Touanne de sincères remerciments.

Paris, le 5 janvier 1904.

Les Membres de la Commission,
J. Gay, Vieille; Girardet, Rapporteur.

RAPPORT DE LA COMMISSION DES COMPTES

SUR L'EXERCICE 1903-1904.

Messieurs,

Le compte de l'Exercice clos le 30 novembre dernier comprend les articles suivants :

Recettes.

		fr
En caisse au 1er décembre 1903		3483,43
	fr	
Cotisations arriérées	3081,25	11808,25
» 1904	8727,00	
Entrées		210,00
Souscriptions perpétuelles		2000,00
Intérêts du capital		6832,76
Vente des publications de la Société		533,00
Subvention ministérielle		240,00
Legs de M. Worms de Romilly		150000,00
Don Guébhard		300,00
Vente d'appareils provenant de la collection de M. Worms de Romilly		3335,00
Total des recettes		178542,44

Dépenses.

	fr
Loyer du siège social	600,00
Traitement de l'agent et gratification	2600,00
Abonnements et reliures	713,40
Indemnité pour le service de la Bibliothèque	300,00
Bibliothèque circulante	62,55
Frais de bureau; étrennes	383,95
Distribution du *Bulletin* et des *Ordres du jour*	1591,25
Recouvrement des cotisations	428,60
Séance de Pâques	1391,20
Gravure du *Bulletin*	205,60
Impressions Gauthier-Villars	2333,65
» Deslis	1311,00
Recueil d'expériences	126,65
Ecole supérieure d'Electricité	1500,00
Frais occasionnés par le legs de M. Worms de Romilly et divers.	473,20
Achat d'obligations { en vertu du testament de M. Worms de Romilly	149681,30
Achat d'obligations { sur autres recettes	12719,65
Total des dépenses	176422,00

D'où résulte un excédent de recettes, en caisse au 1er décembre 1904, de 2320,44

Situation.

La situation de la Société au 30 novembre 1904 se résume ainsi :

Actif.

	fr
516 obligations Nord, Est, Paris-Lyon-Méditerranée, Midi, Orléans et Ouest achetées 229678fr,20 et valant au 30 novembre 1904	233782,75
En caisse au 30 novembre 1904	2320,44
TOTAL DE L'ACTIF IMMÉDIATEMENT RÉALISABLE ..	236103,19

Sur le prix 79996fr,90 de 190 des obligations ci-dessus, ne provenant pas de l'achat fait en conformité du testament Worms de Romilly, une somme de 59700 francs, égale au montant des souscriptions perpétuelles recueillies, correspond au placement obligatoire prévu aux Statuts (articles III et XIV) pour l'emploi des fonds provenant du rachat des cotisations annuelles.

Passif.

Néant.

Actif non immédiatement réalisable.

Indépendamment des titres déposés en banque et qui constituent son avoir immédiatement réalisable, la Société possède, en dépôt chez M. Gauthier-Villars, un grand nombre de volumes qui augmentent sensiblement son avoir. En voici le relevé :

Coulomb	541	3381 volumes.
Ampère I	596	
» II	731	
Pendule I	716	
» II	797	
Constantes I	728	2429 volumes.
» II	808	
» III	893	

Soit 5810 volumes portés ..... pour Mémoire.

Cotisations à recouvrer, évaluées à ..... fr 500,00

Statistique.

Au 1er décembre 1903	992 Membres.
Reçus en 1904	47
TOTAL	1039

A déduire :

Décédés	13	 42
Démissionnaires ou rayés	29	
Membres au 1er décembre 1904		997

savoir :

432 à Paris,
355 en province,
210 à l'étranger,
997

Les Membres perpétuels sont au nombre de 310, savoir :

		fr			fr
287 (dont 54 décédés)	ayant versé...	200,	soit.....		57400,00
7 (dont 1 décédé)	» ...	150,	»		1050,00
9 (dont 1 décédé)	» ...	100,	»		900,00
7	» ...	50,	»		350,00
310					59700,00

La Commission a constaté l'ordre et la régularité des écritures de M. le Trésorier et le dévouement qu'il ne cesse d'apporter dans l'accomplissement de sa tâche; elle vous propose, Messieurs, d'approuver les comptes ci-dessus exposés, et elle vous demande de vous joindre à elle pour adresser de sincères remerciements à M. de la Touanne.

Paris, le 1er janvier 1905.

Les Membres de la Commission,
J. Gay, Vieille; Girardet, Rapporteur.

SÉANCE DU 20 JANVIER 1905.

Présidence de M. d'Arsonval.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.
Le procès-verbal de la séance du 6 janvier est lu et adopté.

Sont élus Membres de la Société :

MM. Devaux-Charbonnel, Ingénieur des Télégraphes, à Paris.
Duchesne-Fournet, ancien Élève de l'École Normale supérieure, à Paris.
Ponsonnard (Abel), Sous-Inspecteur au Service du Matériel de la Traction des Chemins de fer de l'Est, à Paris.

M. le Président rappelle que le Rapport de la Commission des Comptes sur l'exercice 1903-1904 a été adressé à tous les Membres de la Société; il demande s'il y a quelques objections à faire à ce Rapport. Aucune observation n'étant présentée, le Rapport de la Commission des Comptes est mis aux voix et adopté.

M. le Président déclare le scrutin ouvert pour la nomination du Vice-

Président, du Secrétaire général, de l'Archiviste-Trésorier, du Vice-Secrétaire et pour le renouvellement partiel du Conseil.

M. le Président proclame le résultat du vote. Sont élus ;

Vice-Président : M. Amagat (E.-H.), Membre de l'Institut.
Secrétaire général : M. Abraham (Henri), Maître de Conférences à l'Ecole Normale supérieure.
Archiviste-Trésorier : M. de la Touanne, Ingénieur des Télégraphes.
Vice-Secrétaire : M. Lugol, Professeur au Lycée Condorcet.

Sont élus Membres du Conseil pour une période de trois années (1905-1907) :

Membres résidants :

MM. Blondin (J.), Professeur au Collège Rollin.
Guillet, Secrétaire de la Faculté des Sciences de l'Université de Paris.
Jobin (A.), ancien Élève de l'École Polytechnique, Constructeur d'instruments de précision.
Lemoine (J.), Professeur au Lycée Louis-le-Grand.

Membres non résidants :

MM. Beaulard (F.), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Montpellier.
Guilloz (Dr), Professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Nancy.
Kowalski (J. de), Professeur à l'Université de Fribourg (Suisse).
Lang (Victor von), Professeur à l'Université de Vienne (Autriche).

Sont élus Membres de la Commission du *Bulletin :*

MM. Foussereau, Ch.-Ed. Guillaume et Lucien Poincaré.

M. d'Arsonval, Président sortant, prononce l'allocution suivante :

« Messieurs et chers Collègues,

» Le Rapport de votre Commission des Comptes vous a mis au courant de l'état financier de la Société. Vous avez pu constater qu'il est des plus satisfaisants. Je profite de la circonstance pour adresser à ses Membres nos vifs remercîments ainsi qu'à notre dévoué trésorier, M. de la Touanne, dont le rôle ingrat est pourtant capital dans la vie de notre Société.

» Comme événements heureux au cours de l'année 1904 je citerai les récompenses méritées qu'ont obtenues de l'Académie des Sciences un certain nombre de nos collègues : MM. Blondlot, Claude, Maurain, Sagnac et Villard.

» La liste de nos deuils est malheureusement trop longue. Nous avons perdu MM. Duclaux, Sarrau, Marey, Ch. Soret, Lemesle, Rilliet, Jeunet, Lespiault, Thimont, Macé de Lépinay, Van der Vliet.

» L'activité scientifique de la Société s'est manifestée par des communications nombreuses et importantes que vous retrouverez au *Bulletin*.

Je constate avec plaisir que les communications accompagnées d'expériences et de démonstrations objectives sont en majorité.

» Notre exposition de Pâques devient chaque année plus intéressante et constitue un véritable événement scientifique. Je remercie à nouveau tous ceux qui ont contribué à son éclat, sans oublier M. Sandoz, sur le dévouement duquel nous sommes habitués à compter.

» M. Abraham nous a donné son *Recueil d'expériences élémentaires de Physique* qui, en même temps qu'il rend d'inappréciables services, est capable aussi de révéler des vocations. Notre secrétaire général continue à transformer en sinécure le rôle de président et je suis bien aise de pouvoir lui adresser publiquement mes remercîments ainsi qu'aux Membres du Bureau pour m'avoir rendu la tâche présidentielle facile et agréable.

» Je dois également vous rappeler que M. Potier nous a généreusement envoyé un grand nombre de brochures qui ont été distribuées aux membres de la Société qui en ont fait la demande; et je voudrais aussi vous signaler les décisions un peu importantes prises par le Conseil de la Société :

» 1° Vente à l'amiable des appareils de M. de Romilly. Cette vente a produit 7000fr environ, en comptant des versements ultérieurs ou arriérés qui ne figurent pas, pour cette cause, dans le rapport de la Commission des Comptes.

» 2° La Société a été représentée aux Congrès de Saint-Louis par MM. Henri Poincaré et Langevin, vice-secrétaire. Un rapport sur les étalons de longueurs d'onde a été présenté par M. Henri Poincaré au nom de MM. Pérot et Fabry, Membres de la Société.

» 3° La Société prépare un volume de Mémoires sur les propriétés des *ions* et des *électrons*. La préparation de ce volume est très avancée Le Bureau espère que la distribution pourra en être faite avant le mois de juin.

» 4° L'exposition de Pâques aura lieu, comme d'habitude, 44, rue de Rennes. On prend les mesures nécessaires pour faire durer l'exposition pendant 3 jours pour réduire la densité des visites.

» 5° L'exposition de Pâques aura cette année une annexe au Musée pédagogique. Cette annexe sera réservée au matériel des expériences de cours et des manipulations élémentaires qui viennent d'être introduites dans les programmes de l'enseignement secondaire.

» Tels sont, Messieurs et chers Collègues, les événements les plus importants de l'année 1904. Il me reste, en terminant, à vous remercier de nouveau du grand honneur que vous m'avez fait en m'appelant à occuper ce fauteuil. Toutes les formules de remercîment ont été épuisées, permettez-moi de remplacer l'éloquence par l'expression simple, mais sincère, de ma vive gratitude. Durant mon passage ici j'ai fait une remarque qui est tout à l'honneur de la Société. Le président de la Société de Physique n'a pas de sonnette. Il n'en a jamais besoin tant le silence et l'attention sont soutenus durant toutes nos séances. Cela prouve à la fois l'intérêt de ce qu'on y dit et l'urbanité des auditeurs. Que de réunions que l'on dit ou qui se croient plus importantes pourraient vous prendre pour exemple!

» Je termine par cette constatation en cédant à mon successeur, M. Dufet, le fauteuil de la Présidence. »

Au sujet de la communication de M. Berlemont, faite à la séance précédente et concernant un dispositif propre à empêcher la rupture des chutes de trompe à mercure, M. Thurneyssen fait observer que la même difficulté a été résolue antérieurement par M. Chabaud. Le procédé de M. Chabaud consiste à remplacer le capillaire épais par du capillaire à parois minces, moins sensible au frottement du piston de mercure. L'expérience a prouvé, par l'usage continu et intensif depuis trois ans d'une trompe munie de chutes de ce genre, que ce dispositif résout parfaitement

la question. M. Thurneyssen estime d'ailleurs que la rupture des chutes ordinaires, dont il fait un usage journalier, n'est pas aussi fréquente qu'on a semblé le croire.

Sur la théorie du magnétisme; par M. P. Langevin. — I. Les propriétés magnétiques des corps, les manières diverses dont ils réagissent quand on les introduit dans un champ magnétique, se présentent tout d'abord comme extrêmement complexes : les substances ferromagnétiques prennent une aimantation intense, fonction non seulement du champ magnétisant actuel mais de toute la série des champs antérieurs grâce à la possibilité d'un magnétisme rémanent; d'autres corps s'aimantent faiblement dans le sens du champ magnétisant, proportionnellement à son intensité avec un coefficient, la susceptibilité paramagnétique, qui varie, comme l'a montré M. Curie, en raison inverse de la température absolue. De plus l'expérience montre qu'une élévation de température fait passer une même substance de manière continue de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique comme elle permet de passer de manière continue de l'état liquide à l'état gazeux.

Enfin d'autres corps, peut-être les plus nombreux, se polarisent très faiblement en sens inverse du champ magnétisant, sont diamagnétiques, sans qu'il soit possible d'observer aucune transition entre cette propriété et les deux premières et, autre différence profonde, la susceptibilité diamagnétique se montre, sauf dans le cas du bismuth, rigoureusement indépendante de la température et de l'état physique.

On n'a donné jusqu'ici aucune représentation satisfaisante de cet ensemble complexe; l'hypothèse des courants moléculaires d'Ampère, reprise par M. Ewing, rend compte de certains faits de ferro- et de paramagnétisme mais sans indication sur l'origine de ces courants et sur la cause qui les maintient. De plus Weber a supposé, pour représenter le diamagnétisme, l'existence dans les molécules de circuits de résistance nulle dans lesquels la création d'un champ extérieur provoque des courants induits tels que le flux total qui traverse les circuits reste nul, et qui d'après la loi de Lenz correspondent au diamagnétisme. Maxwell, dans son Traité, a tenté d'unifier les hypothèses d'Ampère et de Weber sans obtenir de solution précise, faute d'indications sur la structure moléculaire.

II. Nous possédons aujourd'hui de telles indications, grâce à la théorie qui fait de la matière une agglomération d'électrons en mouvement, de centres électrisés des deux signes, dont on sait que leur déplacement produit dans l'éther un champ magnétique analogue à celui d'un élément de courant, d'intensité proportionnelle à la charge de l'électron et à sa vitesse. La création de ce champ magnétique au moment de la mise en mouvement de l'électron implique une dépense d'énergie proportionnelle au carré de la vitesse, énergie de self-induction du courant équivalent, de même forme que l'énergie cinétique. Un centre électrisé possède donc une inertie par le fait seul qu'il est chargé, et il paraît vraisemblable aujourd'hui que *toute l'inertie* est ainsi d'origine électromagnétique, l'inertie d'une molécule matérielle n'étant que la somme des inerties électromagnétiques des électrons qui la constituent.

De plus, un rayonnement électromagnétique ou lumineux est émis chaque fois qu'un électron subit un changement de vitesse, une accélération, et il est naturel de chercher, dans les électrons qui gravitent à l'intérieur des molécules suivant des orbites fermées, l'origine des raies spectrales, la période des vibrations lumineuses, voisine de 10^{-15} secondes, étant de l'ordre des durées τ de révolution des électrons sur leurs orbites.

On sait comment cette conception permit à M. Lorentz de prévoir cer-

taines particularités du phénomène de Zeeman que l'expérience confirma entièrement.

III. Il est naturel d'assimiler aux courants particulaires d'Ampère ces électrons gravitant sur des orbites fermées. On montre facilement qu'une semblable orbite de surface S parcourue pendant le temps τ par un électron de charge e est équivalente, au point de vue de la production du champ magnétique moyen à l'extérieur, à un aimant normal au plan de l'orbite et de moment magnétique

$$M = \frac{eS}{\tau} = Si,$$

autrement dit l'orbite est équivalente à un circuit traversé par un courant d'intensité $\frac{e}{\tau}$.

Une molécule contient autant de semblables courants particulaires qu'elle renferme d'électrons en mouvement. L'ensemble des aimants équivalents peut avoir un moment magnétique résultant nul : ce sera le cas si l'édifice moléculaire possède une symétrie élevée, incompatible avec la dissymétrie d'un moment magnétique, comparable à celle d'un cylindre tournant. Si la molécule a au contraire pour groupe de symétrie un intergroupe de celui du cylindre tournant, un moment résultant pourra exister et la molécule sera un petit aimant.

Nous allons voir que, dans tous les cas, la création d'un champ magnétique extérieur modifie les courants particulaires comme le supposait Weber en polarisant *diamagnétiquement toutes les molécules.* Cet effet se produit seul si le moment résultant est nul, la matière est diamagnétique au sens ordinaire du mot. Si le moment résultant n'est pas nul, au phénomène diamagnétique initial se superpose un autre phénomène dû à l'orientation des aimants moléculaires par le champ extérieur; la substance est paramagnétique si les actions mutuelles entre aimants moléculaires sont négligeables comme dans le cas des gaz ou des solutions, ferromagnétique dans le cas où ces actions mutuelles jouent le rôle essentiel. Dès que le paramagnétisme apparaît, il est énorme par rapport au diamagnétisme initial et le masque complètement. Ceci explique l'absence de continuité entre le para- et le diamagnétisme : la substance possède ou ne possède pas la dissymétrie du cylindre tournant, le paramagnétisme existe ou non, et, quand il existe, il masque complètement le diamagnétisme initial sous-jacent.

IV. On peut, en effet, démontrer que la création d'un champ magnétique extérieur, qui d'après les équations de Hertz-Maxwell s'accompagne de la production d'un champ électrique, modifie le mouvement des électrons sur leurs orbites, de *tous les électrons,* dans le sens qui correspond au diamagnétisme, le moment magnétique d'un courant particulaire quelconque supposé normal à la direction du champ H étant augmenté de

$$\Delta M = -\frac{He^2S}{4\pi m}$$

si m est la masse de l'électron.

Cette modification diamagnétique est indépendante de la manière dont on a réalisé la superposition du courant particulaire et du champ extérieur, soit par création de celui-ci au moyen d'un courant, soit par déplacement de la molécule dans un champ préexistant. Elle est toujours extrêmement

faible; on a en effet

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{H\tau}{4\pi}\frac{e}{m} < 10^{-9} H,$$

puisque la plus grande valeur connue de $\frac{e}{m}$ est $1,8 \times 10^7$ qui correspond aux corpuscules cathodiques, et que τ est de l'ordre 10^{-15}. *Les champs les plus intenses que nous sachions produire, toujours inférieurs à* 10^5, *ne modifient donc pas de plus du dix-millième le moment magnétique des courants particulaires.*

V. La petitesse de cette modification est justifiée par la petitesse du *phénomène de Zeeman connexe de la modification diamagnétique*. En effet, la variation d'intensité des courants particulaires produite au moment de l'établissement du champ correspond à un accroissement de période des électrons qui gravitent dans un sens, une diminution pour ceux qui gravitent en sens inverse, conformément aux changements qui constituent l'effet Zeeman. L'extrême petitesse de celui-ci justifie ce qui précède sur la petitesse de la modification diamagnétique.

De plus la généralité du phénomène de Zeeman prouve la généralité de l'effet diamagnétique. Même dans le fer qui manifeste l'effet Zeeman, les courants particulaires sont modifiés dans le sens diamagnétique.

VI. Les courants particulaires se comportent comme le feraient des circuits de résistance nulle et de self-induction convenable. En effet, un semblable circuit, de self-induction L, serait modifié par le champ extérieur de manière que le flux total reste constant :

$$\frac{dLi}{dt} = -\frac{d(HS)}{dt},$$

d'où pour l'établissement du champ H :

$$\Delta L i = -HS.$$

Et le circuit considéré sera assimilable au courant particulaire si

$$\Delta M = -\frac{e^2}{4\pi m} HS = \frac{e^2}{4\pi m}\Delta L i,$$

$$L = \frac{4\pi m}{e^2}\frac{M}{i} = \frac{4\pi^2 r^2 m}{e^2}$$

si l'orbite est une circonférence de rayon r.

L'énergie magnétique du circuit sera :

$$\frac{Li^2}{2} = \frac{4\pi^2 r^2 m}{2\tau^2} = m\frac{v^2}{2},$$

c'est-à-dire que le courant particulaire sera complètement assimilable à un circuit de résistance nulle si l'inertie de l'électron qui le constitue est tout entière électromagnétique, si l'énergie cinétique $\frac{mv^2}{2}$ *de l'électron est tout entière sous forme magnétique.*

La modification diamagnétique étant extrêmement faible, les courants particulaires pourrbnt être considérés comme indéformables et d'intensité sensiblement constante et l'on obtiendra une représentation complète des faits du paramagnétisme et des échanges d'énergie entre aimants et courants dans l'hypothèse où les aimants sont constitués de semblables circuits auxquels les lois de l'Électrodynamique ordinaire sont rigoureusement applicables.

VII. Si les molécules ont un moment résultant nul, aucune action du champ extérieur ne suivra la modification diamagnétique, aucun changement de leur mouvement d'ensemble. Les chocs ultérieurs entre molécules se produiront comme auparavant, aucun changement de température ne se montrera, et la propriété diamagnétique acquise subsistera seule.

Inversement, un changement de température ne modifiera pas cette propriété : tous les électrons intérieurs à la molécule contribuent à la produire et le mouvement de ceux-ci, comme le montre l'invariabilité des raies spectrales, ne dépend pas de la température. *On obtient ainsi la loi trouvée expérimentalement par M. Curie sur l'invariabilité de la constante diamagnétique avec la température.*

Si l'on cherche, en partant des constantes diamagnétiques, à calculer ce que doivent être les surfaces des orbites telles que S, on trouve un résultat tout à fait conforme à ce que pouvaient faire prévoir la connaissance des dimensions moléculaires et l'hypothèse que les orbites sont intra-moléculaires. *La petitesse des effets diamagnétiques est nécessitée par la petitesse des dimensions moléculaires.*

VIII. Si les molécules ont un moment résultant non nul, elles subissent tout d'abord la modification diamagnétique tout à fait générale, puis le champ extérieur tend à faire tourner les axes magnétiques; il en résulte un changement du mouvement d'ensemble des molécules, de leur agitation thermique, qui correspond à une inégale répartition de l'énergie cinétique entre les molécules. Ceci est incompatible avec l'équilibre thermique et par l'intermédiaire des chocs mutuels, s'il s'agit d'un gaz, un réarrangement se produira après lequel la température sera uniforme et les aimants moléculaires dirigés de préférence dans le sens du champ extérieur, après lequel la propriété paramagnétique aura apparu. Pour un accroissement dM du moment magnétique résultant, le travail fourni au mouvement d'ensemble des molécules, qui, dans le cas d'un corps gazeux ou dissous, se sera traduit par une élévation de température du milieu, est donné par

$$dW = H\,dM,$$

et, pour maintenir le gaz à température constante, il faut lui enlever une quantité de chaleur équivalente

$$dQ = H\,dM = H\left(\frac{\partial M}{\partial H}\,dH + \frac{\partial M}{\partial T}\,dT\right);$$

en écrivant que $\frac{dQ}{T}$ est une différentielle exacte, on obtient la relation

$$M = f\left(\frac{H}{T}\right),$$

et, dans le cas d'une aimantation proportionnelle au champ,

$$M = k\frac{H}{T};$$

c'est la loi de M. Curie sur la susceptibilité paramagnétique inversement proportionnelle à la température absolue.

Si les actions mutuelles entre aimants moléculaires sont possibles, si la substance est ferromagnétique, la chaleur dégagée n'est équivalente au travail fourni que pour un cycle fermé et l'on obtient alors la chaleur d'hystérésis

$$Q = \int H\, dM.$$

La Physique des solides d'après les idées de M. Tammann, par M. Ch.-Ed. Guillaume. — Les expériences de Tresca sur l'écoulement des solides, les nombreuses applications industrielles de la plasticité des métaux, l'observation des cas intermédiaires, comme ceux que présente par exemple la glu marine, la fusion pâteuse dans un large intervalle de température et beaucoup d'autres phénomènes d'observation courante ont conduit à l'idée de la continuité entre les états solide et liquide de la matière. M. Ostwald a développé cette idée, tandis que M. Le Chatelier, tout en reconnaissant qu'elle est correcte dans des cas nombreux, a attiré l'attention sur le passage brusque et sans états intermédiaires entre les corps amorphes et les cristaux de même composition chimique qui se développent à leurs dépens. M. Tammann a repris cette théorie et, admettant qu'il n'existe pas d'état critique dans le passage du cristal au corps amorphe, il a établi une théorie de la fusion des cristaux dans laquelle la courbe d'équilibre dans le plan $p\theta$ est une courbe fermée, limitant une région limitée du plan, à moins que l'origine des coordonnées (pression nulle et zéro absolu) ne soit comprise à l'intérieur de la courbe; dans ce cas, elle se termine aux axes coordonnés.

Le maximum de la courbe, c'est-à-dire le point de température maxima de fusion du cristal, est réalisé à la pression où la densité du corps amorphe et du cristal est la même. Ce point est atteint, pour les corps qui se solidifient avec contraction, et qui constituent la presque totalité des corps connus aux pressions ordinaires, lorsque la plus grande compressibilité du corps amorphe l'a suffisamment contracté pour qu'il ait rejoint la densité du cristal. Cette égalité n'existe, en général, qu'à des pressions très élevées, de l'ordre de plusieurs milliers d'atmosphères.

Pour que la cristallisation puisse se produire dans la région du plan où un cristal déterminé est stable, il faut, à la fois, que le milieu contienne des germes cristallins et que la viscosité soit assez faible pour que le mouvement de cristallisation se propage. Si l'on part de la température de fusion du cristal pour aller vers les températures basses, la tendance à la formation spontanée des germes cristallins augmente jusqu'à un maximum déterminé au delà duquel elle redescend. Mais la vitesse de propagation du cristal diminue dès que la température est abaissée au-dessous du point de fusion; le maximum de vitesse a lieu immédiatement au-dessous de la température de fusion. Si les expériences montrent en général une augmentation de la vitesse jusqu'à une certaine distance du point de fusion, c'est qu'on a confondu la température du bain avec celle de l'eau mère en contact avec le cristal. En réalité, le dégagement de chaleur par le fait de la cristallisation maintient l'eau mère à une température toujours plus élevée que celle du bain qui entoure le tube dans lequel la cristallisation se propage.

Un grand nombre de liquides, refroidis rapidement à partir d'une température supérieure à celle de la fusion de leur cristal, deviennent bientôt assez visqueux pour que les germes cristallins ne s'y développent plus. On peut alors les amener à la température ordinaire à l'état vitreux, qu'ils conservent indéfiniment; les verres proprement dits, le quartz fondu sont

des exemples de ce fait. Un réchauffement produit souvent la cristallisation; ainsi le verre se dévitrifie par une chauffe suffisante.

Les corps amorphes subissent la fusion pâteuse, qui n'est pas autre chose qu'une diminution graduelle de la viscosité, sans que l'on rencontre, à aucune température, une brusque variation du volume ou un subit dégagement de chaleur. Il n'y a pas, à proprement parler, de changement d'état entre les fils de quartz, dont M. Boys a montré les propriétés élastiques, et le quartz parfaitement liquide. On peut observer, au refroidissement, la diminution graduelle de la plasticité, sur un intervalle de plus de 1000 degrés, pour arriver, finalement, sans aucun saut brusque, à l'élasticité parfaite. En revanche, le passage est brusque entre le quartz amorphe et le quartz cristallisé.

M. Tammann a examiné un grand nombre de corps, pour établir leur diagramme de fusion, et tenter de vérifier ses idées. En fait, il a atteint une seule fois le maximum de la courbe $p\theta$ (sel de Glauber décahydraté); dans tous les autres cas, il a pu néanmoins démontrer que la courbe de fusion a sa concavité tournée vers le bas, indiquant ainsi l'existence d'un maximum à une pression supérieure à celle des expériences.

Les corps examinés par M. Tammann sont déjà nombreux. La plupart ont été étudiés jusqu'à 3000^{atm}, et quelques-uns au delà. M. Guillaume signale, parmi les faits les plus curieux découverts au cours de ces études : 1° L'existence de l'état solide à une température supérieure au point critique, rendue évidente pour plusieurs corps, et démontrée directement pour le chlorure de phosphonium; la température critique de ce corps est 50°, tandis que la courbe de fusion stable a pu être poursuivie jusqu'à 102°; 2° Le diagramme de l'eau, qui comprend trois espèces de glace, dont deux sont plus denses que l'eau. On obtient les deux glaces nouvelles en comprimant vers 2700^{atm} de la glace maintenue à — 60° ou à — 80°; en réchauffant ensuite, on peut tracer leur courbe de fusion, qui commence, pour l'une d'elles, à — 22° et 2200^{atm}, et va en remontant à mesure que la pression s'élève.

SÉANCE DU 3 FÉVRIER 1905.

PRÉSIDENCE DE M. E.-H. AMAGAT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.
Le procès-verbal de la séance du 20 janvier est lu et adopté.

Sont élus Membres de la Société :

MM. POSTEL-VINAY, Ingénieur à Paris;
REBOUL (Georges), Professeur au Lycée de Chartres.

M. le PRÉSIDENT annonce la perte douloureuse que la Société vient de faire dans la personne de M. *Selim Lemström*, Professeur émérite de l'Université d'Helsingfors (Finlande), ancien Membre du Conseil. — M. Selim Lemström laisse des travaux très remarquables sur l'aurore boréale; il s'occupait dernièrement d'électroculture et des méthodes propres à protéger les récoltes contre la grêle.

M. E.-H. Amagat, élu Vice-Président; M. H. Abraham, élu Secrétaire général; M. Lugol, élu Vice-Secrétaire; M. de la Touanne, élu Trésorier-Archiviste; MM. Beaulard, Blondin, Guillet, Guilloz, Jobin, de Kowalsky, von Lang et Jules Lemoine, élus Membres du Conseil, adressent leurs remercîments à la Société.

Entretien des corps vibrants; par M. Guillet. — M. Guillet a adapté à divers systèmes vibrants (pendule de torsion, diapason, corde tendue) un mode d'entretien qui satisfait aux conditions d'entretien parfait établies par M. Lippmann et appliquées par lui au pendule astronomique (1).

Il rappelle brièvement ces conditions. Les corps vibrants, soumis seulement aux forces inhérentes à leur nature et aux résistances provoquées par leur mouvement, oscillent, sous certaines restrictions, suivant la loi:

$$x = x_0 e^{-\lambda t} \sin \omega t.$$

Pour combattre l'amortissement, M. Lippmann communique, par impulsion, l'énergie réparatrice au système. Il est clair qu'alors, la déformation du système restant petite, la période n'est pas altérée puisque les forces qui agissent ultérieurement à l'impulsion satisfont aux mêmes lois qu'antérieurement à celle-ci.

L'invariabilité de la phase exige que l'impulsion soit donnée au moment où le corps prend sa figure d'équilibre; toutefois, si l'on s'arrange de manière que deux impulsions égales consécutives se produisent au moment où le système passe par une même position dans les deux sens, il y a compensation entre les perturbations de phases dues aux deux impulsions.

Pour réaliser les conditions du théorème de M. Lippmann, dans le cas du diapason installé devant la Société, M. Guillet dispose les éléments de l'entretien comme il suit. L'électro-aimant placé entre les branches du diapason reçoit, au lieu d'un courant alternativement établi et interrompu, comme cela a lieu dans l'entretien classique de M. Mercadier, les charges et les décharges périodiquement induites dans un petit transformateur. Les connexions sont établies de manière que ces charges et décharges produisent une action motrice sur les branches aimantées du diapason. Cette aimantation peut être déterminée au moyen de l'électro d'entretien lui-même (électro à noyau aimanté) comme cela a lieu dans le téléphone; mais, si l'on a besoin de pouvoir faire varier à volonté l'intensité d'aimantation des branches, il est préférable de se servir d'une bobine auxiliaire enfilée sur l'une d'elles.

Pour produire les impulsions d'entretien chaque fois que le diapason repasse par la même figure, on intercale dans le circuit primaire un interrupteur formé d'une pièce fixe *a*, et d'une pièce mobile *b* commandée par un fil de cocon fixé à l'une des branches du diapason. Le fil étant tendu, il suffit de fermer le contact par l'approche de *b* pour que le diapason entre en vibration et s'y maintienne. La pièce entraînée doit réagir de façon que le fil reste tendu pendant le retour de *a* vers la position d'équilibre; on est assuré par là que le contact s'établit pour la position du diapason qui correspond à la coupure du circuit primaire du transformateur.

On peut varier beaucoup la disposition de l'interrupteur. Dans l'un des modèles présentés, *a* est un fil métallique à tension micrométriquement réglable et *b* un cylindre de charbon qui peut recevoir un mouvement de translation normal au fil. L'emploi du charbon permet d'éviter toute soudure au contact.

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 13 janvier 1896.

Dans un autre modèle, a est une épingle à cheveux avec pont métallique; les branches de cette épingle sont soudées à deux minces lames d'acier pincées entre deux planchettes que l'on serre l'une contre l'autre à l'aide de deux vis, lorsque la partie libre des ressorts est d'une longueur convenable; b est la tête d'une seconde épingle portant également un fil transversal normal au précédent, sur lequel il vient s'appuyer lorsqu'on fait fléchir, au moyen d'une vis de poussée, la tige qui porte b. Quel que soit le système employé, il est commode de pouvoir régler indépendamment la tension du fil et la pression propre au contact.

En établissant la communication entre a et b par l'intermédiaire d'un fil c, entraîné par a lorsque le corps vibrant passe par sa position d'équilibre dans un certain sens, on pourrait produire les impulsions au moyen d'un courant instantané emprunté directement à la pile, puisque le circuit n'est fermé que pendant le temps très court que dure la suppression du contact, soit entre b et c (aller), soit entre a et c (retour). C'est un interrupteur de ce type que M. Lippmann a construit pour entretenir son premier pendule par le jeu de la charge et de la décharge d'un condensateur.

En admettant que le système vibrant soit tiré du repos et entretenu par des impulsions qui lui sont communiquées à son passage par l'équilibre et qui produisent respectivement une variation ε de la vitesse, l'impulsion relative au $n^{\text{ième}}$ passage déterminera un accroissement de l'amplitude égal à $\varepsilon e^{-n\lambda\frac{T}{2}}$. La durée du régime variable diminue donc lorsque l'amortissement du système augmente.

L'amplitude du régime A a évidemment pour mesure :

$$\frac{\varepsilon}{\omega}\,\frac{1}{1-e^{-\lambda\frac{T}{2}}}\,e^{-\lambda\frac{\varphi}{\omega}}\sin\varphi,$$

φ étant le plus petit angle qui a pour tangente $\frac{\omega}{\lambda}$, en sorte que l'oscillation de régime aura pour loi :

$$x = A e^{-\lambda t}\sin\omega t,$$

le terme $e^{-\lambda t}$ variant seulement de 1 à $e^{-\lambda\frac{T}{2}}$.

En enfonçant plus ou moins le noyau du transformateur, on fait varier ε et, par suite, l'amplitude de régime à laquelle on peut imposer telle valeur que l'on désire. Sous ce point de vue, le système oscillant constitue un instrument de mesures électriques très précis (balistique à amplitude permanente).

M. Guillet indique en terminant un second mode d'entretien très général, qui laisse le corps vibrant absolument libre et qui consiste simplement à transmettre, par le support ou autrement, à un contact vibrant (mis en série avec la pile et l'électro d'entretien) le mouvement du système à entretenir. Par un serrage convenable de ses deux parties, le contact se synchronise sur le corps vibrant et il se produit un véritable *accrochage* entre le diapason et l'électro d'entretien comme cela a lieu dans divers moteurs à courants alternatifs; le système vibre ensuite indéfiniment. Les diverses épreuves auxquelles ont été soumis ces modes d'entretien (figures de Lissajous, expériences de synchronisation) ont convaincu l'auteur de leur perfection, c'est ce qui l'a engagé à les soumettre à la Société.

Appareil automatique avertisseur d'oxyde de carbone, de MM. Albert Lévy et A. Pécoul, présenté par M. Pécoul. — Cet appareil permet de déceler et de doser l'oxyde de carbone à partir de $\frac{1}{100000}$. Un flacon à écoulement d'eau, de 3l, 5 de capacité, aspire l'air qui passe dans un tube en U renfermant de l'anhydride iodique, et placé dans une cheminée métallique au-dessus d'une petite lampe à alcool dont la flamme est réglée de manière à réaliser une température de 70° environ; l'air barbote ensuite dans du chloroforme pur surmonté d'une couche d'eau distillée (pour éviter l'entraînement de vapeur de chloroforme par le courant gazeux), auquel il abandonne l'iode mis en liberté par l'oxyde de carbone; l'opération est très rapide, on met en train en remplissant le flacon aspirateur,

allumant la lampe, et ouvrant le robinet. Le dosage se fait en comparant le petit flacon contenant le chloroforme à une série de tubes étalons identiques, scellés et contenant, sous une couche d'eau distillée, la même quantité de chloroforme dans laquelle on a fait dissoudre les poids d'iode libérés par 1, 2, 3, ... cent-millièmes d'oxyde de carbone; la couleur rose pâle correspondant à $\frac{1}{100000}$ d'oxyde dans l'air analysé est très nette. Cet appareil a permis de constater que même à cette dose infime l'oxyde de carbone détermine des troubles dans l'économie.

Répondant à une demande de M. Pellat, M. Pécoul dit que les carbures de l'air, ne réduisant l'anhydride iodique qu'au-dessus de 200°, ne peuvent fausser les résultats du dosage.

Frein synchronisant électromagnétique, par M. Henri Abraham. — Dans un assez grand nombre d'expériences on est conduit à entraîner un appareil au moyen d'un moteur synchrone actionné par un courant alternatif. On peut alors être gêné par la complication qu'apporte le dispositif spécial de démarrage et par la perturbation que le moteur introduit dans le circuit. On atténue beaucoup ces inconvénients à l'aide de l'artifice suivant.

L'appareil particulier qu'il faut entraîner est mû par un moteur auxiliaire. L'axe de ce moteur porte une roue dentée en cuivre rouge dont les

dents défilent dans l'entre-fer d'un électro-aimant ayant ses deux branches de part et d'autre du plan de la roue. Cet électro-aimant est actionné par le courant alternatif sur lequel on veut synchroniser le moteur.

Supposons pour un instant le synchronisme établi et supposons, en outre, que chaque dent passe dans l'entre-fer au moment où le champ magnétique est presque nul. Les courants induits sont alors très faibles et le *freinage* qu'ils produisent est, par conséquent, minimum.

Pour maintenir le synchronisme, il suffirait que la puissance fournie au moteur auxiliaire fût juste suffisante pour produire le mouvement et pour compenser la petite quantité d'énergie absorbée par le frein. Si nous fournissons au moteur une puissance un peu supérieure à cette valeur critique, ce moteur prend tout d'abord une légère avance de phase sur le courant alternatif. Les dents de cuivre rouge passent alors dans l'entre-fer à des instants où le champ magnétique a une valeur sensible; les courants induits augmentent et le frein absorbe toute l'énergie supplémentaire du moteur, *sans que sa vitesse puisse augmenter*.

En pratique, la manœuvre se réduit à ceci : on met le moteur en marche et l'on fait passer le courant alternatif dans l'électro-aimant. La synchronisation se produit spontanément, le moteur s'*accroche* tout seul.

L'auteur fait fonctionner un appareil stroboscopique mû par un moteur électrique asynchrone qui est synchronisé au moyen des dispositifs qui viennent d'être décrits.

Recherches expérimentales pour la représentation de la fonction photographique, par M. A. Guébhard. — Du fait seul que l'allure générale de la fonction photographique est assez bien connue, dans sa partie moyenne, pour qu'il soit constant qu'après avoir atteint un certain maximum elle redescend vers zéro, il résulte la possibilité d'expliquer, sans autre recours, tous les cas plus ou moins improprement dits de *renversement*, de *destruction* ou encore de *continuation*.

Il est vrai que certaines expériences de M. Bouasse ont mis en doute l'existence d'une courbe énergétique unique, telle que la voudrait le *postulatum* de la proportionnalité des impressions au simple produit des intensités d'excitation par les durées. Et cela justifie la répartition qu'avait faite M. Guébhard, sur une courbe décroissante, des maxima des courbes représentant les valeurs d'impression en fonction du temps d'excitation, pour des intensités diverses de celle-ci.

Mais plus cela complique les expériences, en commandant la recherche d'autant de courbes qu'il y a de modalités d'énergie, et plus il importe d'être fixé préliminairement sur le mouvement de la courbe synoptique vers ses extrémités. Or, si divers expérimentateurs ont définitivement prouvé que le départ, bien loin de se faire en ligne droite, comme avaient cru l'établir MM. Lumière, se fait avec une tangente très peu inclinée sur l'axe, une certaine hésitation pouvait subsister sur l'extrémité lointaine de la courbe qui, d'après MM. Lumière, se rapprochait asymptotiquement de l'axe horizontal, d'après M. Bouasse, s'en écartait de nouveau après une approche à concavité supérieure, et, selon certains commentateurs de M. Janssen, après ce relèvement retombait encore, comme pour finir en ondulations successivement décroissantes.

Attribuant ces divergences à l'inconvénient de n'avoir pour juger, dans chaque expérience, que deux valeurs seulement, entre lesquelles rien ne peut avertir d'un changement de signe de la dérivée, je me suis appliqué à grouper dans un développement toujours le même (bain dilué en cuvette verticale : eau 1000, sulfite de soude anhydre 10, métoquinone 1; durée 1 heure; température 15°), non seulement un certain nombre de plaques (6 ou 12) de même fabrication (pellicules, pour éliminer les perturbations

dites de *halo*), mais encore, sur chaque surface 9×12 ou 13×18, le plus grand nombre possible de valeurs d'impression échelonnées.

Des séries à la fois continues et contiguës peuvent s'obtenir en exposant par fractions longitudinales successives la largeur d'une longue pellicule de $6^{cm} \times 108^{cm} \times n$ à l'action d'une flamme linéaire (pyr-étalon de Giroux) placée parallèlement à la surface à quelque distance en avant d'une extrémité, et éclairant, inversement au carré de la distance, tous les points non protégés. Mais la continuité des valeurs fait obstacle à une bonne différenciation, et mieux vaudrait encore opérer sous une cache à grille, ou faire des expositions fractionnées par saccades, si certains autres inconvénients, relatifs au développement, ne devaient faire préférer l'emploi des formats ordinaires de surfaces sensibles, qu'il suffit de découvrir progressivement par fraction, parallèlement d'abord à l'une puis à l'autre des deux dimensions, pour les diviser en rectangles dont les poses correspondent à la somme des temps de mise à jour dans chaque sens. La comparaison de ces temps de pose avec les noirs correspondants fournit tous les éléments des tracés de courbes, pour chaque intensité de lumière.

Un autre procédé, qui simplifie les longues durées d'exposition, mais au détriment des résultats numériques, consiste à recouvrir chaque plaque de deux caches translucides croisées, formées chacune par l'imbrication en échelons d'un nombre progressif d'épaisseurs de papier blanc, avec, dans chaque sens, une bande opaque pour former réserve, et une bande découverte pour donner le rectangle d'exposition maxima.

Malgré tout, certaines difficultés de mesures, écueil de tous les observateurs, rendent aléatoires les estimations chiffrées, et je dois me borner, pour le moment, à l'énoncé du premier résultat spécialement visé, la réalité d'existence d'un relèvement des noirs après le premier minimum, très voisin de zéro, qui, sur Vitroses Lumière, avec un éclairement de 2000 lux (bec acétylène de 20 pyrs à 10^{cm}) demande de 40 à 50 minutes pour se produire; puis la probabilité très grande d'une baisse nouvelle, après un maximum, inférieur au premier, qui, sur les plaques précitées, paraît très tardif, mais sur pellicules Kodoïd d'Eastmann s'est manifesté nettement pour des expositions de quelques heures au pâle et inconstant soleil d'hiver, toujours suffisant, d'ailleurs, pour produire en moins d'une seconde le premier maximum, au delà duquel toute augmentation de pose ne fait que décroître les noircissements.

M. P. Villard signale à ce sujet que très souvent, quand une plaque sensible est soumise successivement à deux impressions, et que pendant l'une d'elles cette plaque a été localement protégée par un écran, on observe un liséré clair entourant la silhouette de l'écran. On s'attendrait, au contraire, à observer simplement une étroite pénombre de transition, dont la teinte serait intermédiaire entre celles des deux plages contiguës, celle qui est hors de l'écran et celle que ce dernier a momentanément masquée.

Exemple : un papier sensible pour noircissement direct est légèrement impressionné sous un cliché, puis une moitié de l'image étant cachée par un papier noir ou une feuille d'étain, l'autre moitié est continuée en lumière jaune. On développe ensuite le tout, soit à l'acide gallique (en poussant le développement pour que la moitié non continuée rattrape l'autre) ou à l'hydroquinone qui développe indifféremment les deux moitiés. Presque toujours ces deux moitiés, d'intensités presque égales, sont séparées par une étroite bande claire.

L'auteur projette un cliché correspondant à un second exemple :

Des lames de plomb ont été radiographiées sur une plaque; puis, avant développement, la plaque a été exposée à la lumière par fractions successives de manière à avoir des poses croissantes montrant l'inversion progressive de l'image radiographique. Or, pour les expositions intermédiaires

donnant des teintes peu différentes pour l'ombre de la lame et la région circumvoisine (qui a subi successivement l'action des rayons X et de la lumière), la silhouette de la lame est entourée d'un liséré blanc. Il convient de remarquer ici que les lames de plomb n'ont jamais touché la plaque, mais ont été simplement posées sur le papier noir qui entourait celle-ci pendant l'exposition aux rayons X.

On n'observe rien de semblable lorsqu'on délimite les régions adjacentes en projetant une image donnée par un objectif. Ainsi sur les positifs directs obtenus avec des plaques röntgenisées, le contour des objets n'est entouré d'aucun liséré ou auréole quelconque.

M. Guébhard dit que les faits notoires de *silhouettage*, tels que vient d'en signaler quelques-uns M. Villard, sont, à sa connaissance, absolument indépendants de la superposition de deux impressions successives, et parfaitement observables en prenant directement avec un objectif, ou même par contact simple, l'image de « régions adjacentes » fortement contrastées, pourvu que, soit par surexposition, soit par surdéveloppement, l'on amène le phototype à cette phase intermédiaire de l'inversion, mi-positive, mi-négative, pour laquelle avait été jadis inventé le mot d'*amphitype*. L'apparition d'un trait net entre noir et blanc, en passe de devenir gris pour tourner au blanc et noir, est le signe précurseur constant, *mais transitoire*, de l'inversion finale. De là sa présence sur la partie moyenne seulement, et point sur toute la plaque à double exposition de M. Villard, puis sur une partie seulement, et point sur tous ses papiers « continués »; puis enfin son absence sur les « positifs directs » (inversion achevée). Tous ces exemples, par la variété des circonstances données comme principales, confirment le rôle secondaire de celles-ci par rapport à la superexposition ou au surdéveloppement qui se retrouve dans toutes; et le cliché projeté confirme, en outre, sur ce détail spécial, l'unité cumulative, au lieu de l'antagonisme d'action, de la lumière et des rayons X.

La cause, il est vrai, pour le silhouettage, ne peut être encore précisée; mais elle paraît en rapport certain avec les perturbations mécaniques apportées, dans le bain trouble, au libre jeu de la diffusion (et peut-être de certaines polarisations électrochimiques?), par les inégalités de la sculpture en creux de la gélatine ou de sa turgescence en relief.

M. Guillaume rappelle les expériences faites en 1893 par le capitaine Abney en vue d'examiner l'effet d'un éclairage intermittent sur une préparation photographique. Une pellicule enroulée sur un cylindre recevait la lumière directe d'une lampe Harcourt sur des bandes successives exposées, au total, pendant 1 seconde environ, soit d'une façon continue, soit en une succession d'éclats séparés par des temps d'obscurité. La durée de chaque éclat était abaissée jusqu'au millième de seconde. L'action photographique s'est montrée d'autant plus faible que le temps total de l'exposition était divisé en intervalles plus petits.

Ces expériences montrent que les premiers instants de l'exposition sont employés à amener la molécule au seuil de la rupture, et c'est seulement alors que la décomposition commence. Un temps de repos permet aux molécules non décomposées de revenir à leur condition primitive dans laquelle il faut les reprendre dans une nouvelle exposition.

Cette action de la lumière intermittente révèle une nouvelle complication de la fonction photographique.

M. Guébhard dit que c'est précisément la synthèse de ces expériences et de beaucoup d'autres qu'il avait tenté d'exprimer graphiquement par le tableau provisoire et purement schématique présenté dans une précédente

séance. Toute la bibliographie de la question se trouve résumée dans le Mémoire *sur l'inversion*, paru dans la *Revue des Sciences photographiques* dont il vient de déposer un exemplaire sur le bureau, et dont une planche montre également un exemple décisif de *silhouettage*, comme simple phase de début d'une inversion par surdéveloppement.

SÉANCE DU 17 FÉVRIER 1905.

PRÉSIDENCE DE M. H. DUFET.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.
Le procès-verbal de la séance du 3 février est lu et adopté.

Est élu Membre de la Société :

M. NUGUES (Emile), Chef des Travaux électriques à l'École centrale des Arts et Manufactures, à Paris.

Recherches récentes sur la théorie de la décharge disruptive, par M. P. LANGEVIN. — I. M. Langevin désire appeler l'attention de la Société sur certains résultats obtenus à l'étranger dans les dernières années et qui apportent une contribution importante à l'explication des phénomènes si complexes de la décharge disruptive. En particulier le phénomène d'ionisation par les chocs, dont l'étude détaillée est due principalement à M. Townsend, d'Oxford, semble constituer un des faits élémentaires, une des lettres de l'alphabet grâce auquel il sera possible de déchiffrer l'ensemble des manifestations multiples de l'étincelle électrique. Il a déjà permis à M. Townsend d'élucider de manière satisfaisante ce qui constitue en quelque sorte le seuil de la décharge disruptive, le problème du potentiel explosif, et de prévoir à quelques volts près la différence de potentiel nécessaire pour faire éclater une étincelle entre deux surfaces conductrices planes et parallèles séparées par un gaz sous pression quelconque. C'est sur ce point que M. Langevin se propose d'insister particulièrement.

II. Il rappelle tout d'abord les résultats expérimentaux relatifs à la question du potentiel explosif entre plans parallèles dont les plus nets sont ceux obtenus par M. Carr (1), grâce à la précaution d'éviter que l'étincelle ne puisse jaillir au bord des plateaux parallèles lorsque, par suite de la diminution de pression du gaz ou de distance des plateaux, l'étincelle jaillit d'autant plus facilement qu'elle est plus longue. Il a suffi pour cela de noyer les bords des plateaux dans un isolant solide qui oblige l'étincelle à passer dans la région centrale et à n'avoir pour longueur que la distance mesurée des plateaux. Les résultats obtenus confirment dans des limites très étendues et de manière très précise une loi énoncée pour la première fois par M. Paschen (2) et d'après laquelle *le potentiel explosif* V, *au lieu d'être une fonction des deux variables indépendantes : distance a des plateaux et pression p du gaz, ne dépend, pour un gaz donné à une température donnée, que du produit ap*, ou encore, si l'on

---

(1) CARR, *Phil. Trans.*
(2) PASCHEN, *Wied Ann.*, t. XXXVII, 1889, p. 79.

tient compte du résultat de M. Bouty [1] sur l'indépendance de la cohésion diélectrique d'un gaz et de la température pour une densité donnée du gaz, *le potentiel explosif est uniquement fonction de la masse du gaz comprise entre les plateaux pour une surface donnée de ceux-ci.*

On aurait donc, à une température donnée,

$$V = F(ap), \tag{1}$$

et, si l'on suppose la température variable,

$$V = F'\left(\frac{ap}{T}\right). \tag{2}$$

Tous les résultats expérimentaux de M. Carr, relatifs à des conditions variées de pression et de distance, se représentent en effet très exactement par une courbe unique, *la courbe de Paschen,* obtenue en portant en abscisses le produit ap et en ordonnées la valeur correspondante du potentiel explosif obtenue expérimentalement.

Cette courbe présente la particularité que V passe par un minimum égal environ à 350^{volts} pour l'air, V diminue avec le produit ap pour les grandes valeurs de celui-ci, puis augmente de nouveau quand ap tend vers O, ce fait correspondant à la difficulté bien connue avec laquelle l'étincelle passe entre des électrodes dans un gaz très rare. La loi de Paschen n'est d'ailleurs applicable qu'aux distances a supérieures à quelques microns; au-dessous de cette limite un phénomène nouveau intervient, qu'a étudié M. Earhart [2] et dans lequel le gaz semble ne plus jouer aucun rôle. C'est l'action du champ électrique intense sur la surface même des électrodes qui paraît devenir essentielle ici pour faire jaillir une étincelle sous une différence de potentiel qui diminue avec la distance et qui tend vers zéro quand on arrive au contact intime.

Les considérations suivantes permettent de suivre le mécanisme de la production de l'étincelle aux distances *supérieures* à quelques microns, de retrouver la loi de Paschen et de prévoir la grandeur des potentiels explosifs.

III. L'hypothèse qui permet d'obtenir ces résultats est celle de l'ionisation par les chocs, émise simultanément par divers physiciens comme conséquence naturelle de ce que l'on sait sur la conductibilité communiquée aux gaz par les rayonnements des corps radioactifs.

On sait que les portions de ces rayonnements classés sous le nom de rayons α et β sont constituées par des particules électrisées en mouvement très rapide, chargées positivement pour les rayons α et semblables aux particules constituant les rayons de Goldstein dans les gaz raréfiés, négativement pour les rayons β et semblables aux corpuscules cathodiques. La conductibilité communiquée aux gaz par le passage à travers eux des rayons α ou β résulte de la production à l'intérieur du gaz de particules électrisées libres ou ions positifs et négatifs susceptibles de se déplacer dans un champ électrique. Tous les faits se groupent bien autour de cette idée que les ions sont produits au moment où une particule α ou β, projectile lancé avec une grande vitesse, vient frapper 1^{mol} du gaz et la dissocie en deux centres électrisés l'un positif, l'autre négatif, ce dernier ayant toutes les propriétés du corpuscule cathodique, deux mille fois moins inerte que l'atome d'hydrogène, tandis que le centre positif paraît constitué par le reste de la molécule ainsi dissociée. C'est donc le choc des particules α

---

(1) E. Bouty, *Journ. de Phys.*, 4e série, t. I, p. 403, 1903.
(2) Earhart, *Phil. Mag.*, t. I, 1901, p. 147.

ou β contre les molécules du gaz qui produit les ions auxquels est due la conductibilité. Si aucun champ électrique intense n'existe dans le gaz, les deux centres électrisés résultant de la dissociation groupent autour d'eux des molécules neutres du gaz par attraction électrostatique et constituent les ions à la température ordinaire.

Mais, si un champ intense existe dans le gaz, son action sur les centres électrisés ainsi libérés leur communiquera une grande vitesse entre deux chocs contre les molécules et pourra leur faire jouer le même rôle que les particules α ou β, qui en diffèrent seulement par la vitesse acquise au moment de l'émission par la substance radioactive.

On conçoit donc que dans un champ intense les centres électrisés dissociés dans le gaz puissent à leur tour agir comme de véritables rayons α ou β et produire l'ionisation, la dissociation des molécules neutres au moment de leurs chocs contre celles-ci. Il est à prévoir d'ailleurs que la probabilité pour que cette dissociation se produise dépend de la force vive possédée par la particule électrisée au moment du choc, c'est-à-dire du travail $X\lambda$ fourni à l'unité de charge par le champ électrique X le long du chemin moyen λ parcouru par le centre électrisé entre deux chocs contre les molécules. Le chemin λ variant en raison inverse de la pression du gaz, la probabilité pour la dissociation par choc dépend donc du rapport $\frac{X}{p}$ du champ électrique à la pression et doit augmenter pour un même champ quand la pression diminue.

IV. M. Townsend [1] a trouvé ces prévisions entièrement confirmées par l'étude du courant i obtenu à travers un gaz placé entre deux plateaux parallèles et traversé par une radiation constante quand on fait varier la différence de potentiel V entre les plateaux. La courbe qui représente i en fonction de V présente trois régions : quand V est très faible le courant augmente avec V pour prendre dans la seconde région une valeur constante, le *courant de saturation* quand V est assez grand pour recueillir toutes les charges électriques libérées dans le gaz par la radiation, à mesure de leur production. La courbe reste parfaitement horizontale dans une très grande étendue de variation de V tant que le champ n'est pas suffisant pour produire l'ionisation par les chocs et tant qu'on ne peut extraire du gaz que ce qu'y libère la radiation extérieure. Mais dans la troisième région on constate que i augmente rapidement avec V suivant une courbe d'allure exponentielle jusqu'à ce que, la décharge disruptive se produisant, le courant obtenu soit hors de proportion avec le courant de saturation initial. C'est bien ce que l'on peut attendre si les ions libérés dans le gaz peuvent à leur tour dissocier de nouvelles molécules.

M. Langevin reproduit cette expérience en opérant dans de l'air sous une pression voisine de 1^{cm} de mercure.

V. Les centres positifs et négatifs ne produisent pas l'ionisation par choc avec une égale facilité. Les négatifs, beaucoup plus petits et moins inertes, ont un libre parcours plus grand et prennent dans le même champ une énergie plus grande entre deux chocs consécutifs; l'expérience montre en effet qu'ils commencent plus vite que les positifs à dissocier les molécules au moment de leur choc contre elles. M. Langevin reproduit une expérience de M. Townsend où le courant est produit entre un tube d'aluminium de 5^{cm} de diamètre et un fil de cuivre concentrique d'environ $0^{cm},05$ de diamètre, le tube contenant de l'air sous environ 1^{cm} de mercure, traversé par le rayonnement d'un sel radifère. Aux faibles différences de potentiel

---

[1] J.-S. Townsend, *Phil. Mag.*, février 1901.

entre le fil et le tube, le courant obtenu conserve la même intensité quand on renverse le sens de la différence de potentiel, mais si celle-ci devient grande (600 à 800 volts) le *courant est beaucoup plus intense si le tube est négatif que s'il est positif*. Or dans le premier cas tous les centres négatifs libérés dans le gaz par la radiation doivent traverser la région de champ intense voisine du fil pour être recueillis par celui-ci, et dans le second cas cette même région est traversée par tous les centres positifs et par les quelques négatifs que la radiation y produit. Le changement d'intensité montre donc la différence d'activité des centres négatifs et positifs au point de vue de l'ionisation par les chocs.

En admettant que seuls les centres négatifs agissent, il est facile de montrer que, entre deux plateaux parallèles de distance l où la radiation extérieure produit un courant de saturation i_0, le courant obtenu i, quand un centre négatif peut, sur un centimètre de parcours, dissocier α molécules, a pour valeur :

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha l} - 1}{\alpha l}, \tag{3}$$

la comparaison de cette formule avec la variation expérimentale a permis à M. Townsend de calculer la constante α pour diverses valeurs du champ et de la pression.

Or il est facile de prévoir la forme de la relation entre α, X et p.

La probabilité pour qu'un choc soit suivi de dissociation est fonction, comme on l'a vu, de $\frac{X}{p}$, et est mesurée par le rapport du nombre α de molécules dissociées au nombre $\frac{1}{\lambda}$ de molécules rencontrées le long d'un centimètre de parcours. Elle est donc égale à $\alpha\lambda$, c'est-à-dire proportionnelle à $\frac{\alpha}{p}$, et l'on doit avoir :

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{X}{p}\right).$$

M. Townsend a vérifié, en effet, que ses résultats se représentent bien par une *courbe unique* si l'on porte en abscisses $\frac{X}{p}$, et en ordonnées $\frac{\alpha}{p}$.

Les résultats déduits de ces mesures lui ont permis d'expliquer qualitativement et quantitativement les résultats obtenus par M. Stoletow sur la décharge des corps électrisés négativement par la lumière ultra-violette. Si l'action directe de celle-ci sur le métal produit un courant i_0 et si le champ permet l'ionisation par les chocs, le courant obtenu est ici :

$$i = i_0 e^{-\alpha l}. \tag{4}$$

VI. Mais pour arriver à l'interprétation de la décharge disruptive qui doit se maintenir d'elle-même sans qu'une action extérieure comme celle de la lumière ultra-violette vienne produire les premiers centres négatifs capables d'ioniser par choc, il faut admettre que, conformément à ce que l'on sait sur les rayons α, les centres positifs peuvent donner lieu au même phénomène, quoique plus difficilement que les négatifs et produire par centimètre β dissociations de molécules, avec $\beta < \alpha$, et pour la même raison que précédemment

$$\frac{\beta}{p} = f'\left(\frac{X}{p}\right).$$

Il est facile de montrer dans cette hypothèse que l'intensité i du courant obtenu dans le gaz sous l'action de la lumière ultra-violette est donnée par [1]

$$(5) \qquad i = i_0 \frac{(\alpha - \beta) e^{(\alpha-\beta)l}}{\alpha - \beta e^{(\alpha-\beta)l}},$$

relation qui se réduit à (4) pour $\beta = 0$.

Ici le courant i peut augmenter indéfiniment et correspondre à la décharge disruptive si la distance l prend une valeur a telle que le dénominateur s'annule :

$$(6) \qquad a = \frac{\log\alpha - \log\beta}{\alpha - \beta} = \frac{1}{p} \frac{\log f - \log f'}{f - f'}.$$

Or f et f' sont des fonctions de $\frac{X}{p}$, c'est-à-dire de $\frac{V}{ap}$, si V est la différence de potentiel aX qui produit la décharge disruptive; on peut donc écrire la relation (6) :

$$ap = \varphi\left(\frac{V}{ap}\right),$$

ou

$$V = F(ap),$$

ce qui est la *loi de Paschen*.

Cette fonction F a été déduite par M. Townsend de la mesure du courant i correspondant à un même courant i_0 pour diverses valeurs de X, p et l. La comparaison de la formule (5) avec l'expérience permet de calculer α et β et par suite les fonctions f et f' pour diverses valeurs de $\frac{X}{p}$, et par conséquent d'obtenir la fonction F, c'est-à-dire de prévoir le potentiel explosif pour une distance donnée a des plateaux et une pression p du gaz, *et la valeur ainsi prévue s'accorde à quelques volts près sur plusieurs centaines avec les résultats de l'expérience directe.* De plus, la théorie précédente permet de suivre le mécanisme du phénomène et de comprendre pourquoi la décharge disruptive se produit.

VII. Cette décharge disruptive établie, la différence de potentiel nécessaire pour la maintenir est toujours inférieure à celle nécessaire pour provoquer l'étincelle, grâce au changement de répartition du champ dû à la présence dans le gaz de quantités considérables d'électricité, principalement d'ions positifs qui en raison de leur mobilité moindre s'accumulent dans le gaz, principalement au voisinage de la cathode vers laquelle ils se meuvent et localisent près de celle-ci la plus grande partie, en général, de la chute de potentiel entre les électrodes. Le champ électrique peut donc être assez intense dans cette région pour permettre aux centres positifs de produire l'ionisation par les chocs sans que la différence de potentiel totale soit égale au potentiel explosif qui devait créer ce champ intense de manière uniforme dans l'intervalle des électrodes [2].

Un téléphone hygiénique, par M. D'Arsonval. — Le nouvel appareil présenté de la part de la Société des Téléphones appartient à la catégorie

---

[1] Townsend, *Phil. Mag.*, novembre 1903, p. 598.
[2] Townsend, *Phil. Mag.*, décembre 1904, p. 738.

des *microtéléphones* ou *appareils combinés*, c'est-à-dire de ceux dans lesquels le *transmetteur* (ou *microphone*) et le *récepteur* (ou *écouteur*) sont fixés à une poignée unique, reliée par un cordon souple de longueur convenable, au socle ou à l'applique qui contient le commutateur, les organes d'appel et, s'il y a lieu, la bobine d'induction.

Il y aura bientôt vingt ans que le premier microtéléphone fut mis à la disposition du public français et, depuis cette époque, de nombreux types d'appareils combinés furent construits, dans lesquels, à part la diversité des microphones et des récepteurs employés, la disposition générale des appareils restait celle du début, avec ses avantages, dont le principal est leur grande mobilité, et ses inconvénients, dont le plus grave est leur caractère fort peu hygiénique.

Dans tous ces appareils, en effet, et même dans les postes à microphone fixe, la personne qui parle a, en face de la bouche, un cornet ou une plaque, qui sont destinés à recueillir les sons émis, mais qui, malheureusement, recueillent en même temps les particules de salive et la vapeur d'eau, plus ou moins saturées d'impuretés, de la respiration.

Qui peut dire de quelles contagions l'usage du téléphone n'a pas été la cause, grâce à ces dangereux réceptacles de microbes?

Au contraire, le *monophone* (c'est le nom donné au nouvel appareil) semble, par sa disposition même, éviter absolument ce grave danger.

Le récepteur s'applique contre l'oreille; rien ne le distingue des récepteurs ordinaires, sinon que son boîtier, agrandi en profondeur, contient également un microphone très puissant, composé de deux membranes entre lesquelles se trouve la grenaille de charbon.

Ce microphone reçoit les sons simultanément sur ses deux faces grâce à un cornet qui sert en même temps de poignée à l'ensemble de l'appareil, et dont l'orifice arrive tout au plus, lorsque le récepteur est à l'oreille, à hauteur des lèvres, mais *latéralement*, de telle sorte qu'il se trouve rigoureusement en dehors de ce que nous pourrions appeler... la zone dangereuse.

La puissance de transmission est considérable, car le microphone employé est d'une extrême sensibilité; il est même probable qu'un pareil degré de sensibilité n'est possible que grâce à l'interposition, entre le centre d'émission des sons et les plaques vibrantes, d'une colonne d'air qui fait l'office d'amortisseur.

Aussi cet appareil est à la fois extrêmement puissant, très léger, peu encombrant et par-dessus tout hygiénique. Il réalise donc, à ces divers titres, un sérieux progrès en téléphonie.

Sur les Rayons cathodiques, par M. P. Villard. — L'auteur s'est proposé de répéter les expériences tres anciennes de Hittorff sur l'enroulement des rayons cathodiques dans un champ magnétique (hélices, spirales, circonférences).

La cathode employée est un disque d'aluminium de 8^{mm} à 12^{mm} de diamètre placé dans une sorte de boîte constituée soit par une coupe en verre fermée par une plaque de mica percée d'une ouverture de 3^{mm} à 4^{mm}, soit par un anneau en verre fermé par deux micas dont l'un est percé. Cette ouverture est placée en face du point de la cathode par lequel on veut produire l'émission, et, l'afflux cathodique se trouvant ainsi très resserré, l'émission n'a lieu qu'en face du centre de l'ouverture. La distance entre le mica et la cathode est de 2^{mm} à 3^{mm}, ce qui laisse toute liberté de déviation aux rayons. On obtient ainsi un pinceau très fin, peu divergent, et de grande densité au centre, mais entouré de rayons aberrants. On arrête ceux-ci, quand cela est nécessaire, au moyen d'un écran de mica percé d'une ouverture de 1^{mm} à 2^{mm} placée sur la trajectoire prévue.

Le vide est toujours fait sur l'oxygène pur dans lequel le trajet des rayons

est très visible et très net. Un petit tube latéral contient quelques centigrammes d'oxyde d'argent très pur, préparé sans faire usage de filtres ni de caoutchouc. On chauffe légèrement cet oxyde pour régénérer l'ampoule usée; on fait passer le courant pendant 2^h ou 3^h pour élever au contraire le degré de vide.

Champ uniforme. — Le faisceau est diaphragmé comme il vient d'être dit, après une demi-spire ou trois demi-spires de l'hélice à obtenir. On observe ainsi très aisément une dizaine de spires (*projections*). Mais, si le champ est intense (500 unités et au-dessus), bien que le trajet total correspondant à un nombre donné de spires soit alors relativement faible, on n'observe plus que 5 ou 6 spires au plus; on constate que le rayon s'affaiblit rapidement et que de tous ses points partent des rayons magnétocathodiques en lesquels il finit par se résoudre (d'autres expériences ont confirmé cette observation).

L'hélice, parfaitement régulière d'ailleurs, finit ainsi par se transformer en un simple cylindre magnétocathodique.

Si les rayons sont dirigés normalement au champ, ils forment une famille de circonférences qui sont assujetties à la seule condition de repasser par le point de départ qui est un point de la trajectoire. A l'opposite de ce point s'observe le maximum de dispersion du faisceau. (Pour cette expérience la boîte cathodique doit être d'épaisseur aussi faible que possible.) En faisant passer le faisceau par une fente on élimine les rayons obliques qui donneraient des hélices.

Dans cette expérience on constate encore l'émission de rayons magnétocathodiques par tous les points du faisceau.

Champ non uniforme. — Dans un champ non uniforme les rayons ne s'enroulent pas sur un tube de force comme l'Auteur l'avait affirmé dans une autre publication. Il se passe le singulier phénomène que voici :

Supposons l'ampoule placée entre les pôles coniques de l'électro-aimant, la cathode assez éloignée de l'axe du champ et près d'un des pôles : le faisceau s'enroule suivant une courbe hélicoïdale de pas et de diamètre d'abord croissants, jusqu'au milieu de l'entrefer; puis, en se rapprochant du pôle opposé, le pas de la spirale diminue plus vite que son diamètre et s'annule avant que les rayons n'aient atteint la paroi, puis devient négatif et le faisceau revient en arrière, décrivant une hélice semblable à la précédente, mais dont la direction générale forme un angle notable avec celle de la première, en sorte que l'hélice de retour s'écarte de plus en plus de l'hélice d'aller. Revenus près du pôle de départ les rayons enroulés s'arrêtent encore, rebroussent chemin et ainsi de suite; l'ensemble serait à peu près représenté par un ressort en hélice qu'on aurait replié en zigzag. Aucun rayon ne peut arriver aux parois de l'ampoule, qui ne sont atteints que par les rayons magnétocathodiques issus de toutes les spires.

Si l'on considère les axes des tubes fusiformes sur lesquels s'enroule le faisceau cathodique dans ses allées et venues d'un pôle à l'autre, l'ensemble de ces axes constitue une ligne en zigzag qui n'est pas plane, mais tracée sur une surface de révolution ayant pour axe l'axe du champ, de telle sorte que, si aucun obstacle n'est interposé, et si les rayons cathodiques ne s'évanouissaient pas progressivement, on aurait ce singulier spectacle d'un enroulement qui se réfléchit en quelque sorte à une distance bien définie des pôles de l'électro, et s'enroule lui-même autour de l'axe du champ magnétique.

Pratiquement on peut observer cinq ou six allers et retours de la spirale cathodique (projection, présentation d'une photographie stéréoscopique).

M. Jean Perrin et M. Paul Langevin font remarquer tous deux que la

production des rayons magnétocathodiques tout le long du rayon cathodique pourrait sans doute s'expliquer par l'ionisation que produit dans l'ampoule le choc des particules cathodiques contre les molécules du gaz raréfié. Les rayons cathodiques de faible vitesse qui se formeraient ainsi s'enrouleraient aisément autour des lignes de force du champ magnétique.

M. Villard ne conteste pas que cette explication, qui se présente tout naturellement, ne soit extrêmement séduisante; cependant il lui semble qu'il y a encore certains détails d'expérience que cette explication ne suffirait pas à éclaircir.

SÉANCE DU 3 MARS 1905.

Présidence de M. H. Dufet.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.
Le procès-verbal de la séance du 17 février est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. Debierne, à Paris.
Kahlbaum (G.-W.-A.), Dr ph., Professeur à l'Université de Bâle (Suisse).
Lévesque (Lieut.), à la Section de Géodésie du Service géographique de l'armée, à Paris.

M. le Président annonce en ces termes le décès de M. Fernet :

J'ai le regret d'annoncer à la Société la perte qu'elle a faite en la personne de M. *Fernet*, inspecteur général honoraire de l'Instruction publique. M. Fernet faisait partie de la Société, on pourrait dire dès avant sa naissance; il était de ces physiciens qui, sur l'instigation de Bertin et de d'Almeida, se réunissaient à l'École normale et transformèrent un peu plus tard ces réunions amicales en Société régulière. La carrière universitaire de M. Fernet fut aussi simple que brillante : un an après sa sortie de l'Ecole normale, il entrait comme professeur à Saint-Louis et y restait 20 ans, sauf 3 ans d'enseignement au Lycée Bonaparte. En 1874, il devint inspecteur de l'Académie de Paris, et quelques années après inspecteur général. Ces hautes fonctions et la permanence d'une action s'exerçant pendant une si longue période, expliquent l'autorité légitime qu'il avait acquise et son influence considérable sur l'enseignement des sciences physiques.

Enregistrement continu de l'ionisation atmosphérique, par M. Charles Nordmann. — I. L'auteur, après avoir rappelé les travaux antérieurs faits par M. Langevin et par lui-même sur la question, décrit le dispositif suivant qui paraît fournir une solution simple du problème de l'enregistrement des ions atmosphériques (problème que la méthode d'Elster et Geitel et celle d'Ebert ne permettaient pas de résoudre), et qui, contrairement au dispositif de M. Langevin, ne comporte ni mouvement d'horlogerie, ni complications mécaniques d'aucune sorte et fournit un enregistrement absolument ininterrompu :

L'air atmosphérique étudié passe dans un condensateur cylindrique dont l'armature externe est reliée à une pile de charge suffisante pour produire le courant de saturation. L'armature interne isolée est reliée d'une part à l'une des paires de quadrants d'un électromètre Curie amorti, dont l'autre paire est au sol, l'aiguille étant chargée; cette armature est reliée d'autre part à un récipient métallique isolé, contenant un liquide conducteur (de l'eau par exemple) et qui, constitué en vase de Mariotte, fournit par un orifice capillaire d'une disposition spéciale placé à sa partie inférieure, un écoulement régulier de n gouttes de rayon r par seconde. Celles-ci tombent dans une cuvette métallique reliée au sol et comme chacune d'elles emporte une charge égale à rE (E étant à ce moment le potentiel de l'armature intérieure du condensateur cylindrique), il s'ensuit que l'écoulement liquide enlève chaque seconde à celle-ci une charge égale à nrV. Sous l'influence du champ produit entre elle et l'armature externe, cette armature interne reçoit d'autre part par seconde une charge Q due aux ions de l'air étudié, et qui pour une valeur donnée du courant gazeux (dont le débit est donné par anémographe) est proportionnelle au degré d'ionisation de cet air.

Si C est la capacité du système isolé « armature interne-vase de Mariotte », l'augmentation de charge de ce système dans un temps dt est égale à la charge fournie par le gaz ionisé, diminuée de celle qu'emporte l'écoulement liquide, ce qu'exprime la relation

$$C\,dE = Q\,dt - nr\,E\,dt.$$

Dans la pratique, et conformément au calcul, l'équilibre s'établit au bout d'un temps très court entre la charge Q apportée par les ions et le courant de décharge nrV par unité de temps, de sorte que

$$E = \frac{Q}{nr}.$$

Les déviations de l'électromètre, enregistrées en fonction du temps sur un cylindre photographique à fente horizontale, sont donc sans cesse proportionnelles au nombre des ions par unité de volume de l'air étudié.

II. Avec un électromètre donné la sensibilité de l'appareil est d'autant plus grande que E est plus grand pour une valeur donnée de Q. Dans les conditions ordinaires Q est de l'ordre de 3.10^{-4} unités électrostatiques C.G.S. On apprécie d'ailleurs le demi-millimètre sur le cylindre enregistreur; avec un électromètre donnant sur ce cylindre une déviation de 500^{mm} pour 1 volt, il faudra donc, pour pouvoir apprécier facilement toutes les variations supérieures ou égales à $\frac{1}{100}$ Q, prendre $E = \frac{1}{10}$ de volt $= \frac{1}{3000}$ unité électrostatique; c'est-à-dire, comme le montre la formule ci-dessus,

$$nr = \frac{Q}{E} = 9.10^{-1} = 9^{mm},$$

ce qui correspond par exemple à un écoulement de quatre gouttes et demie de 2^{mm} de rayon par seconde, écoulement facilement réalisé dans la pratique.

Le volume d'eau V écoulé dans 24 heures est d'ailleurs

$$V = 86400 \times \frac{4}{3}\pi r^2 \times n = 86400 \times \frac{4}{3}\pi nr \times r^2;$$

comme nr est constant, l'appareil une fois réglé, on voit que V diminue comme le carré de r. Mais si l'on diminue r il faut augmenter le nombre des

gouttes proportionnellement, et avec un seul ajutage, on ne tarderait pas à avoir non plus un écoulement de compte-gouttes, mais un jet liquide. On évite cet inconvénient en employant non plus un, mais plusieurs ajutages. Avec deux ajutages, on arrive facilement à n'avoir plus besoin que d'un écoulement d'environ 1^l en 24 heures, ce qui permet d'employer un appareil de très petites dimensions.

Il suffit, pour régler l'appareil et modifier sa sensibilité, de soulever ou d'enfoncer le tube qui passe dans le bouchon du vase de Mariotte; on modifie par là même à volonté la vitesse d'écoulement, c'est-à-dire la valeur de nr.

La seule précaution pour que l'écoulement soit constant est de placer le vase de Mariotte dans un endroit où les variations de température ne dépassent pas une dizaine de degrés. Dans ces limites l'influence des variations de température sur le coefficient de viscosité de l'eau, c'est-à-dire sur la vitesse de l'écoulement, reste négligeable.

Par suite de l'humidité due aux gouttes, il faut prendre certaines précautions faciles à réaliser pour l'isolement du vase de Mariotte; il suffit par exemple de le suspendre à un isoloir du genre Mascart.

Enfin, il est bon une fois par jour de mettre le système isolé à la terre, simplement en le touchant avec le doigt, pour repérer la position du zéro de l'électromètre qui peut se modifier légèrement d'un jour à l'autre.

III. M. Nordmann signale en terminant une application simple de l'appareil précédent : en réunissant les différents éléments d'une batterie de piles de charge à un support isolé sur lequel peut se déplacer un commutateur relié à un vase de Mariotte analogue à celui du dispositif ci-dessus, on peut par le simple jeu de ce commutateur porter ce vase à des potentiels variables à volonté, c'est-à-dire en faire écouler des quantités d'électricité quelconques dans l'unité de temps. Si l'on fait tomber ces quantités d'électricité sur l'armature isolée d'un condensateur avec lequel on fait des mesures de radioactivité par la méthode ordinaire, on pourra par le jeu du commutateur faire que ces quantités soient exactement égales et de signe contraire à celles qui sont apportées par les ions du gaz.

Autrement dit on peut, à l'aide de ce dispositif, réaliser simplement une méthode de zéro pour les mesures de radioactivité. Bien entendu ce dispositif n'a pas les limites d'application très étendues de la méthode de zéro qui comporte l'emploi du quartz piézoélectrique de M. Curie, et dont le principe est d'ailleurs différent. Il permet cependant de mesurer facilement les courants compris entre 10^{-10} ampères et 0; c'est-à-dire ceux qui sont dus aux radioactivités faibles et moyennes.

Il a l'avantage, commun à toutes les méthodes de zéro, d'être indépendant à la fois de la sensibilité de l'électromètre employé et de la capacité des appareils.

M. Langevin désire remettre la discussion des critiques qui viennent d'être adressées à l'appareil qu'il a proposé avec M. Moulin, pour l'enregistrement des ions de l'atmosphère, au moment où ils présenteront à la Société de Physique cet appareil actuellement en construction et qui figurera à l'exposition de Pâques. Bien qu'un premier modèle ait déjà fonctionné au Collège de France et fourni effectivement des courbes d'enregistrement, M. Langevin préfère ne présenter à la Société qu'un appareil étudié et donnant des résultats positifs au lieu d'un simple projet.

Il tient cependant à faire remarquer qu'il n'est pas d'accord avec M. Nordmann sur la manière dont se pose le problème de l'enregistrement : il est essentiel de ne pas admettre que l'air circule dans le condensateur cylindrique d'Ebert sous débit constant; la nécessité de puiser l'air à l'extérieur introduit une influence considérable du vent et il semble nécessaire d'em-

ployer une méthode de mesure indépendante de telles variations, donnant directement la quantité d'électricité disponible dans un volume connu d'air.

De plus, M. Langevin ne croit pas que la solution par écoulement d'eau proposée par M. Nordmann pour le problème particulier qu'il a envisagé soit la plus recommandable. Il semble que, pour obtenir une fuite proportionnelle au voltage du système électrode-électromètre, il soit plus simple de relier celui-ci à un plateau métallique isolé placé dans un récipient métallique fermé relié au sol et contenant une petite quantité d'un sel d'uranium. L'air rendu conducteur par la radiation fournit sous une différence de potentiel très faible, comme celles que M. Nordmann mesure, un courant exactement proportionnel à cette différence, au début de la courbe de saturation. On éviterait ainsi, sans parler d'autres inconvénients, ceux dus à l'humidité et à la nécessité de renouveler l'eau.

M. de Kowalski signale qu'il a obtenu de très bons résultats en employant le procédé que M. Langevin vient de rappeler. Il enferme, dans un récipient couvert de plomb et suffisamment éloigné de l'électromètre pour que les radiations qui pourraient sortir jouent un rôle inappréciable, une certaine quantité d'amalgame d'uranium qui lui permet de doser exactement la quantité de matière active employée.

M. Nordmann répond ce qui suit aux deux observations présentées par M. Langevin :

En premier lieu, M. Langevin lui reproche de ne pas connaître le volume d'air sur lequel il opère : or, dans la méthode de M. Nordmann on connaît exactement ce volume d'air à l'aide d'un anémomètre qui peut, soit fonctionner comme anémographe, soit obturer quelques instants, chaque fois qu'un volume certain d'air a passé, la fente du cylindre enregistreur. La nécessité d'un appareil anémométrique n'est d'ailleurs pas particulière à la méthode de M. Nordmann; elle s'impose dans toutes les méthodes de courants gazeux et, dans l'enregistreur proposé par M. Langevin, c'est précisément un anémomètre de disposition particulière qui met en marche périodiquement les mécanismes et le mouvement d'horlogerie que comporte cet appareil.

En second lieu, en ce qui concerne le dispositif que propose M. Kowalski, M. Nordmann ne conteste pas qu'il ne résolve également, en principe, la question de l'enregistrement. Mais il est à craindre que l'emploi d'un sel d'uranium, que comporte ce dispositif, tant par suite de la radioactivité induite dans l'appareil, que par suite de l'ionisation de l'air produite aux alentours par les parties du rayonnement radioactif qui sortiront forcément de l'enceinte contenant le sel actif, à travers les portions isolantes de celle-ci, ne perturbe et ne masque complètement les phénomènes d'ionisation naturelle de l'atmosphère, si peu intenses, et n'enlève une grande partie de leur signification aux nombres obtenus. Ce sont précisément ces motifs qui ont conduit les physiciens allemands à éliminer soigneusement l'emploi de substances radioactives dans les bâtiments où fonctionnent des appareils destinés à l'ionisation atmosphérique, et qui notamment leur font rejeter complètement les collecteurs radioactifs pour l'étude du champ électrique de l'atmosphère dans les stations où l'on en étudie en même temps l'ionisation.

Sur le silhouettage. — M. Guébhard, après avoir passé en revue, sur ses anciens phototypes, les nombreux cas de *silhouettage* observés, soit dans ses expériences de 1903 sur l'*inversion*, soit dans ses recherches de 1890 sur l'*auréole photographique* (improprement dite *halo*), croit pou-

voir conclure que si la formation d'une ligne noire, entre plages d'impressions très différentes, ne se manifeste réellement jamais, comme il l'a dit, que comme phase intermédiaire (amphitype) de l'inversion de surpose ou de surdéveloppement, sans dépendre directement d'aucune des circonstances particulières que lui assignait pour causes M. P. Villard, elle n'a pas davantage pour cause première, ainsi que tendait à le faire croire une observation déjà discutée (*Comptes rendus*, t. CXXVI, 1898, p. 1441) de M. Colson (*Comptes rendus*, t. CXXVI, 1898, p. 471), certains phénomènes de diffusion à l'intérieur du bain, pendant le développement, mais bien ceux de diffusion lumineuse à l'intérieur de la couche sensible pendant l'impression elle-même.

M. Abney, en effet, en démontrant [*Phil. Mag.*, (4), t. L, 1875, p. 46-52] qu'à l'intérieur des émulsions chaque granule illuminé de bromure d'argent devient un vrai centre d' « irradiation » et que le phénomène de l'auréole n'est dû qu'à la portion de cette lumière diffusée qui, après avoir pénétré dans le verre, se réfléchit partiellement ou totalement sur la face postérieure pour venir attaquer la gélatine par derrière, M. Abney établissait par là même l'existence forcée de réactions de voisinage de globule à globule, faisant, par exemple, qu'un point non illuminé reçoit toujours indirectement une portion de la lumière arrivée à un point contigu.

Lors donc que (par un procédé, d'ailleurs, quelconque de pose simple ou double, directe ou indirecte) on juxtapose sur la surface sensible deux impressions, l'une maximale, l'autre nulle, il doit s'établir forcément autour de la première un liséré de bavure lumineuse, qui, au développement normal, c'est-à-dire, en l'occurrence, ou très court, ou très faible, donnera un étroit dégradé de péné-lumière intermédiaire, élargissant au détriment de l'ombre l'image claire. Cela est très visible si l'on photographie (sur pellicules ou sur papier, pour éviter les réflexions accessoires) un damier ou, comme je le pratiquais, une fenêtre projetée sur le ciel, avec ses carreaux alternativement recouverts, par paires, de découpures de papier noir, ou de leurs contreparties à jour. C'est toujours le blanc, qu'il soit entouré ou entourant, qui, sur le négatif, est mangé par le noir.

Mais vient-on à pousser le développement au delà de la stricte limite du noircissement maximum de la zone impressionnée? Au fur et à mesure que celle-ci s'éclaircit et que les blancs commencent à se voiler, la petite zone frontière, correspondant à une impression moyenne, se détache en continuant à monter et s'accentue de plus en plus après que la rapide chute de la plage surexposée et la lente ascension de l'autre ont établi le faux et provisoire *état neutre*, observé sur papier par M. Villard.

Tandis qu'alors s'accélèrent d'un côté la descente et de l'autre la montée, la mince ligne de silhouettage, attardée à son plateau de maximum, peu à peu se laisse rattraper et fondre dans le noir voisin, de manière qu'une fois l'inversion accomplie, c'est un positif à proportions restituées qui remplace le négatif à dimensions faussées, où, comme dans l'œil humain, l'objet blanc sur noir paraissait plus grand que noir sur blanc.

Outre ce nouveau rapprochement qui s'établit entre les sensibilités physique et physiologique, il est permis de signaler la double et réciproque confirmation que tirent de là les vues de sir W. Abney sur l'irradiation et celles de M. Guébhard sur la fonction photographique, puisqu'il a suffi de se reporter aux premières pour voir s'éclairer par les secondes un fait depuis longtemps connu, mais jamais encore expliqué, et par M. Guébhard lui-même, à tort, déclaré irréalisable sur papier en 1898, tout en en soupçonnant déjà la véritable cause.

Sur la radioactivité induite du radium. — M. Curie constate, tout d'abord, que, parmi les diverses théories émises pour expliquer les propriétés des corps radioactifs, l'hypothèse qui consiste à admettre la

désagrégation des atomes de ces corps et la transmutation des éléments se présente aujourd'hui comme la plus vraisemblable et se trouve actuellement admise par un grand nombre de physiciens et de chimistes. M. et Mme Curie, dès le début de leurs recherches sur les corps radioactifs, ont énoncé cette hypothèse parmi celles qui conviennent pour expliquer les phénomènes. Les conséquences de cette hypothèse et les suppositions relatives à la vie limitée des éléments radioactifs ont même été signalées par Mme Curie dans une conférence faite en 1900 devant la Société des Amis des Sciences, conférence qui a été publiée dans la *Revue scientifique*. Cependant, devant l'abondance des théories émises et encore incertaines, M. Curie a préféré ne point préciser une hypothèse déterminée. C'est ainsi que, dans l'étude des radioactivités induites et des émanations, MM. Curie et Debierne ont montré que l'on pouvait poursuivre très loin l'étude des phénomènes en admettant seulement qu'il existe sous diverses formes successives des centres d'énergie radioactive, sans préciser *a priori* quel est le support de cette énergie; la nature de ces centres devait ressortir ensuite nettement de l'étude des faits. MM. Rutherford et Soddy ont au contraire dès le début admis que les émanations et les radioactivités induites sont constituées par des particules matérielles provenant de la désagrégation des corps radioactifs, et l'expérience semble entièrement justifier cette hypothèse. La condensation des émanations aux températures très basses, les récentes découvertes de MM. Ramsay et Soddy relatives à la pression de l'émanation du radium et à la production de l'hélium par le radium, viennent apporter un appui considérable à l'hypothèse de la désagrégation. Ainsi, avec MM. Ramsay, Rutherford et Soddy, M. Curie adopte aujourd'hui le langage qui résulte de la théorie de la désagrégration : le radium émet une émanation gazeuse, matérielle et radioactive qui se désagrège à son tour en donnant des matières radioactives solides auxquelles sont dus les phénomènes de la radioactivité induite.

L'émanation M du radium disparaît en fonction du temps t suivant une loi exceptionnelle $M = M_0 e^{-mt}$ avec $m = 2,012 \times 10^{-6}$ en inverse de seconde. D'après cette loi l'émanation diminue de moitié en 4 jours. La quantité $\frac{1}{m}$ représente la vie moyenne de l'émanation, elle est de 5,75 jours.

M. Curie entretient la Société des recherches qu'il a faites en collaboration avec M. Danne sur les lois de la disparition de la radioactivité induite par l'émanation du radium.

On laisse un corps solide pendant longtemps (plusieurs jours par exemple) à s'activer en présence de l'émanation du radium et l'on étudie ensuite la manière dont il se désactive à l'air libre. L'intensité du rayonnement est donnée en fonction du temps par la différence de deux exponentielles (en négligeant toutefois ce qui se passe pendant les cinq premières minutes). On a

$$I = I_0 [K e^{-ct} - (K - 1) e^{-bt}] \tag{1}$$

avec

$$b = 0,000538; \quad c = 0,000413; \quad K = 4,2;$$

le temps étant exprimé en secondes, I_0 étant le rayonnement initial.

On explique convenablement les phénomènes en admettant que l'émanation, pendant tout le temps qu'elle agit, crée avec une vitesse constante une première substance radioactive B qui se désagrège spontanément suivant une loi exponentielle,

$$\frac{dB}{dt} = -bB \quad \text{et} \quad B = B_0 e^{-bt},$$

b étant un coefficient caractérisant la vitesse de la désagrégation de la substance. La substance B en se désagrégeant se transforme en une deuxième substance radioactive C qui se désagrège à son tour et disparaîtrait si elle était seule suivant une loi exponentielle $C = C_0 e^{-ct}$, c étant un coefficient caractéristique. Mais, comme la substance C est entretenue par la substance B, elle varie en réalité suivant une loi plus complexe.

Quand on soustrait le corps solide à l'action de l'émanation, les substances B et C existent sur sa surface dans une certaine proportion. Cette proportion varie en fonction du temps et, si l'on admet que le rayonnement produit par C en se désagrégeant est plus important que celui produit par la quantité correspondante de B, on trouve que le rayonnement est donné par la différence de deux exponentielles, c'est-à-dire par une formule de même forme que l'équation (1).

Dans le cas particulier où B n'émet pas de rayons et où C rayonne seule la théorie indique que l'on doit avoir

$$K = \frac{b}{b-c} = \frac{0,000538}{0,000538 - 0,000413} = 4,3;$$

l'expérience ayant donné 4,2 pour K, on voit que l'on peut admettre que la substance C rayonne seule. On ne s'est aperçu de cette relation entre les coefficients que plusieurs mois après leur publication.

On peut chercher suivant quelle loi s'active un corps solide à partir du moment où il est mis brusquement en contact avec un volume d'air renfermant une proportion constante d'émanation. On trouve par expérience, conformément aux indications de la théorie, que la loi suivant laquelle le rayonnement du corps I tend vers sa finale I_0 est la même que la loi de décroissance de l'activité d'un corps soustrait à l'action de l'émanation. On a en effet, alors,

$$(2) \qquad I_0 - I = I_0 [K e^{-ct} - (K-1) e^{-bt}]$$

avec les mêmes constantes que précédemment.

Enfin, dans le cas où un corps a été soumis à l'action de l'émanation pendant un temps relativement court, la loi de désactivation à l'air libre devient très complexe. On trouve par exemple, pour une durée d'activation de 5 minutes, que le rayonnement pendant la désactivation décroît d'abord avec une très grande rapidité; au bout de quelques minutes l'intensité du rayonnement passe par un minimum et se met ensuite à augmenter; au bout de 30 minutes le rayonnement passe par un maximum, puis il décroît et finit par s'éteindre suivant la loi exponentielle simple correspondant au coefficient $c = 0,000413$.

On ne peut expliquer ces phénomènes complexes dans l'hypothèse de deux substances seulement. On parvient au contraire à tout expliquer en supposant sur les corps activés trois substances A, B, C, caractérisées par les coefficients d'exponentielle $a = 0,00401$, $b = 0,000538$, $c = 0,000413$. La substance A est créée directement par l'émanation; elle disparaît rapidement; la quantité de A baisse de moitié en 2,9 minutes (sa vie moyenne est de 4,3 minutes). La substance A en se désagrégeant donne naissance à la substance B, laquelle, quand elle est seule, se détruit spontanément avec baisse de moitié en 21 minutes (vie moyenne de 33 minutes). La substance C est entretenue par B et se détruirait si elle était seule avec baisse de moitié en 28 minutes (vie moyenne de C : 39 minutes). Les substances A et C rayonnent et ionisent l'air, B ne rayonne pas.

Lorsqu'un corps a été soumis pendant un temps θ à l'action de l'émanation et qu'il se désactive ensuite à l'air libre, le rayonnement du corps

en fonction du temps est donné par la formule

$$(3) \qquad I = I_1 \left[\lambda (1 - e^{-a\theta}) e^{-at} - \frac{b}{b-c} \frac{a}{a-b} (1 - e^{-b\theta}) e^{-bt} + \frac{b}{b-c} \frac{a}{a-c} (1 - e^{-c\theta}) e^{-ct} \right],$$

a, b, c ayant les valeurs citées; d'après des expériences récentes de M. Duane, $\lambda = 1,28$.

Toutes les formules dont nous nous sommes servi sont symétriques en b et en c, de telle sorte que l'on explique aussi bien tous les phénomènes d'activation et de désactivation à la température ambiante en supposant

$$(\mathrm{I}) \qquad b = 0,000538; \qquad c = 0,000413;$$

ou bien

$$(\mathrm{II}) \qquad b = 0,000413; \qquad c = 0,000538.$$

Physiquement les deux interprétations sont cependant très différentes: avec la première supposition la substance B qui ne rayonne pas disparaît la première au bout de 2 à 3 heures sur le corps qui se désactive; la substance C reste alors seule et disparaît suivant une loi exponentielle simple.

Dans la deuxième supposition la substance B entretient C qui se détruit plus rapidement qu'elle-même; au bout de 2 à 3 heures les substances B et C sont dans un rapport constant sur le corps qui se désactive et disparaissent toutes deux en même temps suivant une même loi exponentielle simple.

La radioactivité induite devient volatile aux températures élevées et distille d'un corps chaud sur un corps froid. L'étude de ce phénomène permet de conclure que l'hypothèse $b = 0,000538$, $c = 0,000413$ est celle qu'il convient d'adopter. La substance B est plus volatile que la substance C.

Quand on chauffe un instant un corps activé à une température supérieure à 900°, la nature de la radioactivité induite semble modifiée et la constante de temps de la loi de disparition de l'activité induite n'est plus la même qu'avant. Il semble y avoir là un fait entièrement nouveau.

M. Victor Henri remarque : 1° que la loi de décomposition de l'émanation trouvée par M. Curie étant une loi exponentielle, si cette décomposition se produit d'après les mêmes lois que celles des réactions chimiques ordinaires, il en résulterait que la décomposition de l'émanation est une réaction monomoléculaire, c'est-à-dire dans laquelle *une* molécule du corps se décompose. Cette conclusion élimine donc toutes les hypothèses de polymérisation d'après lesquelles plusieurs molécules de l'émanation se combineraient pour faire apparaître un corps nouveau; en effet, dans ce dernier cas la vitesse de la réaction serait proportionnelle au carré ou à une autre puissance de la quantité d'émanation.

2° L'hypothèse de M. Curie relative à la production de deux réactions successives : émanations → corps B et corps B → corps C qui se produisent toutes les deux suivant des lois exponentielles, peut être rapprochée de certaines études expérimentales faites en Chimie physique sur des radiations successives (par exemple: hydrolyse du raffinose), dans lesquelles on a pu vérifier expérimentalement l'exactitude de la loi de la réaction totale représentée par une différence de deux exponentielles, c'est-à-dire précisément de la forme de celle qui exprime la décomposition de l'émanation.

Soupape à mercure pour les trompes à eau; par M. l'abbé VARIN. — I. *Description.* — L'appareil est tout entier en verre. Dans une ampoule à moitié pleine de mercure pénètrent :

1° En bas, un tube venant de la trompe à eau, terminé par une partie recourbée s'ouvrant tout près de la paroi de l'ampoule à quelques millimètres au-dessus de la surface du mercure;

2° En haut, un tube de 85^{cm} de hauteur relié aux appareils à vider, terminé dans l'ampoule par une pointe plongeant dans le mercure.

Quand la canalisation est à la hauteur de la trompe on peut prolonger le tube ascendant par un tube descendant qui ramène son extrémité un peu au-dessus de l'ampoule.

II. *Fonctionnement.* — Si l'on fait le vide dans l'ampoule avec la trompe à eau, l'air des appareils y arrive par la pointe et se rend à la trompe. La pression de l'eau qui alimente la trompe vient-elle à diminuer, ou même à cesser brusquement, l'eau de la trompe reflue dans l'ampoule, avec ou sans air, et fait monter le mercure dans le tube vertical qui se trouve ainsi fermé et intercepte toute communication avec les appareils à vide.

Quand de nouveau la trompe fonctionne l'eau de l'ampoule y retourne, sauf la couche de quelques millimètres comprise entre la surface du mercure et l'ouverture du tube C; en même temps le mercure baisse dans E.

On facilite le retour de l'eau en plaçant la trompe en contre-bas de la soupape.

La cuve est suffisamment large pour que le mercure ne s'y déplace pas de plus de $\frac{1}{2}$ millimètre au moment du fonctionnement de la soupape.

En outre l'ouverture inférieure du tube manométrique a été largement évasée pour atténuer les phénomènes capillaires.

Dans ces conditions la soupape fonctionne de façon tout à fait satisfaisante en n'augmentant guère que de 2^{mm} ou 3^{mm} de mercure la pression résiduelle.

La capacité des longs câbles sous-marins; par M. DEVAUX-CHARBONNEL. — L'objet de la présente Communication est de proposer une nouvelle méthode pour la mesure de la capacité des longs câbles.

Les câbles sous-marins télégraphiques sont essentiellement des condensateurs. Ils se composent d'un conducteur central isolé par un diélectrique, la gutta-percha, et protégé par une couche de fils de fer jointifs. Pendant les transmissions le conducteur est relié à une pile, dont un pôle est à la terre, l'armure en contact avec l'eau de mer est maintenue au potentiel du sol. Le câble constitue donc un condensateur cylindrique, dont la capacité serait fixe et bien déterminée si le diélectrique était de l'air. Malgré l'hétérogénéité que présente toujours la gutta, cette condition est néanmoins réalisée, au moins dans les conditions d'emploi des câbles. Les voltages ne sont jamais supérieurs à 50 volts, le nombre des signaux est toujours voisin de 10 par seconde, de sorte que les forces électromotrices sont toujours faibles ainsi que la fréquence des courants.

La capacité est donc une quantité qui reste constante pendant les différentes phases des transmissions. La détermination exacte de sa valeur est du plus grand intérêt. La théorie et la pratique s'accordent pour démontrer que la propagation des courants ne dépend que de la résistance et de la capacité. La résistance se mesure sans difficulté. La capacité, au contraire, n'a jamais jusqu'à présent été déterminée avec précision. Il y a tout lieu de le regretter, car cet élément joue le plus grand rôle dans le rendement du câble, dans sa vitesse de transmission et il est également le seul qui permette de déterminer le point de rupture du câble dans le cas où la rupture est accompagnée d'un isolement du conducteur.

En général, la mesure d'une capacité C se ramène à celle de la quantité d'électricité Q que prend un condensateur quand on le charge avec une force électromotrice E. On a, par définition,

$$Q = CE.$$

Pour les câbles la mesure de Q est difficile parce que le phénomène de la charge n'est pas instantané. On peut facilement déduire des formules données antérieurement, à propos d'une étude sur la propagation du courant [1], la valeur du courant de charge au début du câble, et le rapport de la charge prise à la charge totale en fonction du temps. On trouve

$$I = \frac{2E}{R}\sum_{1}^{\infty} e^{-\frac{n^2\pi^2 t}{4CR}}$$

et

$$\frac{\int_0^t I\,dt}{CE} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\left(1 - e^{-\frac{n^2\pi^2 t}{4CR}}\right)$$

où n représente la suite des nombres impairs.

En posant

$$I_0 = \frac{E}{R},$$

valeur du courant en régime permanent, et en désignant par A et B les quantités

$$A = \frac{I}{I_0}, \qquad B = \frac{\int_0^t I\,dt}{CE},$$

on peut calculer le Tableau suivant qui montre que la charge n'est pas encore complète au bout d'un temps $t = 2CR$.

En poursuivant plus loin le calcul on trouve qu'à 3 CR la charge est complète à 4 dix-millièmes près. On peut alors admettre que le phénomène est pratiquement terminé. Pour les grands câbles, CR varie entre 6 et 8 secondes. La charge dure donc près d'une demi-minute :

$\frac{t}{CR}$.	A.	B.
0,001.....	20,14	0,06
0,01.....	5,60	0,11
0,1.....	1,78	0,36
0,5..... ...	0,58	0,76
1,0.....	0,17	0,92
2,0.....	0,01	0,99

On ne peut espérer mesurer la charge d'un câble par les méthodes usuelles du galvanomètre-balistique ou du pont de Wheatstone, qui supposent que la charge est instantanée. Il faut avoir recours à des procédés indirects.

---

[1] *Éclairage électrique*, 20 avril 1902.

La méthode la plus usitée et qui a donné jusqu'à présent les meilleurs résultats est celle de Thomson.

Elle consiste à charger un condensateur en même temps que le câble en disposant l'expérience de façon que les charges soient égales et de signe contraire. Après avoir mélangé les charges, l'ensemble doit être revenu à l'état neutre. On le vérifie au moyen d'un galvanomètre qu'on relie au point de jonction et l'on fait varier les conditions expérimentales jusqu'à ce que le résultat désiré soit atteint. On déduit facilement, de la charge connue qu'a prise le condensateur, celle du câble et par conséquent sa capacité.

Les nombres qu'on obtient dans une série d'expériences ne sont jamais concordants. Le temps pendant lequel le condensateur et le câble doivent être réunis après avoir été chargés est voisin d'une demi-minute. Les pertes par isolement, par pénétration de la charge dans le diélectrique, viennent fausser les résultats. Les variations de potentiel du sol compliquent encore le phénomène.

Même en répétant les déterminations, une assez grande incertitude affecte le chiffre qui est adopté comme moyenne, à cause de la discordance des nombres individuels. Ce chiffre d'ailleurs est généralement trop faible à cause des pertes que ne peut éviter la méthode.

Il y a donc intérêt à chercher un procédé expérimental qui permette de faire la mesure dès que la liaison de la pile et du câble est rompue.

Afin de se rapprocher des conditions réalisées pendant les transmissions, il est également très utile de réduire la durée de la charge.

L'auteur propose la méthode suivante :

Charger en même temps que le câble un condensateur C_1 de comparaison disposé en cascade. Le temps de charge est considérablement réduit.

Des formules

$$I = \frac{2C_1^2 E\pi^2}{C^2 R}\sum_0^\infty n^2 e^{-\frac{n^2\pi^2 t}{CR}}$$

et

$$\frac{\int_0^t I\,dt}{CV} = 1 - 2\sum_0^\infty e^{-\frac{n^2\pi^2 t}{CR}}$$

où V représente le potentiel du câble et où l'on a donné à n la série des valeurs entières, on déduit le Tableau suivant où A′ et B′ sont les analogues des quantités A et B calculées précédemment :

$\frac{t}{CR}$.	A′.	B′.
0,1.....	0,449	0,22
0,2.....	0,139	0,72
0,3.....	0,052	0,90
0,5.....	0,007	0,99

La charge est 4 fois plus rapide, elle est complète à 8 dix-millièmes près au bout de 0,8CR, c'est-à-dire au bout de 5 à 6 secondes dans les cas les plus défavorables.

A ce moment on a l'égalité

$$C_1(E - V) = CV.$$

Il suffit de supprimer la liaison du câble C et du condensateur C_1 et de

relier ce dernier à la terre pour qu'il prenne instantanément un complément de charge

$$Q' = C_1 V$$

qu'on mesure au moyen d'un galvanomètre balistique.

On mesure de même la quantité $C_1 E = Q_1$.

On en déduit C par la formule simple

$$C = C_1 \frac{Q_1 - Q'}{Q'}.$$

Les phénomènes d'absorption, les pertes légères dues à l'imperfection de l'isolement n'affectent pas la méthode.

En opérant successivement avec les pôles positif et négatif de la pile, on élimine très facilement les erreurs dues aux variations du potentiel du sol tout le long du câble.

Voici la série des résultats obtenus le 8 février dernier sur le câble de Brest à Dackar :

1120	microfarads.
1100	»
1116	»
1104	»
1100	»
1116	»

Les résultats sont assez concordants pour qu'on puisse admettre que la moyenne 1109 microfarads est exacte à 2 ou 3 microfarads près. La moyenne d'un plus grand nombre de mesures serait encore plus exacte.

La capacité déduite des mesures effectuées en usine sur les différentes sections est de 1050♀. Les résultats obtenus tendent à confirmer cette hypothèse, qui n'a pas encore été nettement vérifiée, que les fortes pressions, atteignant 500^{kg}, auxquelles le câble est soumis dans les grandes profondeurs, en diminuant l'épaisseur du diélectrique ont pour effet d'augmenter sa capacité.

SÉANCE DU 17 MARS 1905.

PRÉSIDENCE DE M. H. DUFET.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 3 mars est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. CHRÉTIEN, Professeur au Lycée de Saint-Brieuc;
CORVISY (Didier), Etudiant en Médecine à Limoges;
DUPLAÏ (P.-J.), Professeur au Collège de Pamiers;
GUILLIN (Louis), Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Besançon;
IVANOFF (Constantin), Assistant de Physique à l'Université d'Odessa (Russie);
MASCART (Auguste), Professeur au Collège, Le Câteau;
VELTER (P.-J.-E.), Ingénieur des Arts et Manufactures à Paris;
WILLIAMS, Libraire à Londres (Angleterre).

M. le Président rappelle que notre confrère, M. le Dr A. Guébhard, Agrégé de Physique des Facultés de Médecine, a mis, depuis trois ans, à la disposition de la *Société française de Physique* un don annuel de 300fr *destiné à encourager des recherches d'ordre physique, chimique ou mathématique, pouvant se rattacher à ses anciens travaux sur la figuration électrochimique des systèmes équipotentiels.*

Ces fonds peuvent être accumulés ou fractionnés. Ils seront attribués cette année, s'il y a lieu, par le Conseil de la Société à l'auteur ou aux auteurs d'un travail terminé ou en cours d'exécution.

M. le Président annonce la perte douloureuse que la Société vient de faire en la personnne de M. *Victor-René Muller,* Professeur au Lycée, Le Puy.

M. le Président annonce que le 43e Congrès des Sociétés savantes s'ouvrira à Alger, dans le grand amphithéâtre de l'École de Médecine et de Pharmacie, le mercredi 19 avril prochain, à 2 heures précises. Ses travaux se poursuivront durant la matinée du jeudi 20 et les journées du samedi 22 et du mardi 25 avril.

M. le Ministre de l'Instruction publique et des Beaux-Arts présidera la séance de clôture le mercredi 26 avril.

Présentation du télescope de Foucault légué par M. de Romilly, par M. A. Cotton. — Le plus précieux de tous les instruments dont la Société française de Physique a hérité de son regretté bienfaiteur est sans doute le télescope dont le miroir porte sur le verre la signature de Foucault. Ce miroir présente en effet un intérêt particulier, le rapport entre le diamètre et la distance focale ayant la valeur $\frac{1}{4,3}$: c'est la seule fois que Foucault a entrepris de surmonter les difficultés que l'on rencontre dans la construction d'un miroir aussi ouvert.

Avant que l'on remette cet instrument à l'Observatoire de Paris, auquel la Société de physique l'a elle-même donné, M. Cotton a été autorisé par le Conseil à refaire l'argenture du miroir, à étudier l'instrument et à le présenter à une séance de la Société.

Ce télescope, pourvu d'une monture soignée de Secrétan, est très *ramassé:* son miroir a un diamètre utile de 15cm,2 et un foyer de 68cm environ; on se rend compte immédiatement de la propriété particulière de l'instrument lorsqu'on le compare avec une lunette astronomique dont l'objectif a un diamètre voisin. (Projection d'une photographie où figurent côte à côte le télescope et une lunette de 16cm de diamètre et 225cm de foyer.) Ces deux instruments de taille si différente, utilisés dans les mêmes conditions atmosphériques et avec le même grossissement, ont permis d'apercevoir les mêmes détails d'objets terrestres éloignés. Des télescopes aussi ouverts donnent des images stellaires d'un grand éclat et sont particulièrement précieux pour la photographie d'astres faibles : M. Cotton, parlant des quelques télescopes courts construits depuis Foucault, projette une photographie de nébuleuse faite à l'observatoire Yerkes par M. Ritchey, avec un télescope retouché par les procédés de Foucault (2 pieds de diamètre et 8 pieds de distance focale).

La valeur indiquée par Foucault pour le pouvoir séparateur est 200000, légèrement inférieure à la valeur calculée par la formule connue, valable pour les miroirs ordinaires dont le diamètre est le sixième du foyer. Cette valeur de 200000 correspond à une mire d'intervalle fondamental égal à 1mm placée à 200m, ou, si l'on veut, à une séparation angulaire égale très sensiblement à une seconde. M. Cotton a mesuré ce pouvoir séparateur et a retrouvé, une fois l'argenture faite et le miroir centré, la valeur indiquée par Foucault.

Cette mesure a été faite en employant comme mire un fragment de réseau (5 traits au millimètre) emprunté à une trame comme on en emploie pour la photogravure. En le plaçant devant un verre dépoli bien éclairé on obtient commodément une mire avec des intervalles blancs et noirs sensiblement égaux, comme cela est nécessaire. De tels réseaux sont tracés avec une régularité satisfaisante : pour s'en rendre compte il suffit d'observer le phénomène de *moiré* obtenu en superposant deux de ces réseaux. (Projection.)

M. Cotton parle ensuite des différents procédés employés pour l'étude et pour la retouche des miroirs et des surfaces optiques en général. Il indique le principe de la méthode Hartmann utilisée à Iéna et rappelle les trois procédés de Foucault qu'il a employés à cette occasion. Ces procédés qui ne fournissent pas directement, comme la méthode précédente, les résultats numériques nécessaires pour définir complètement la forme de la surface, permettent en revanche de se rendre compte, très rapidement et d'un seul coup, de l'ensemble de ses propriété optiques.

1° L'expérience suivante est faite à propos du premier procédé de Foucault, celui du quadrillage : on a tracé sur une glace argentée un réseau à mailles carrées de 1^{mm} de côté ; on l'adosse à un verre dépoli bien éclairé et l'on en forme avec une lentille achromatique ordinaire une image agrandie. En se plaçant au delà, à une distance suffisante, la pupille diaphragme suffisamment les faisceaux pour que chaque point de l'image que l'on voit soit formé par une région étroite de la lentille. Les défauts de celle-ci apparaissent par la distorsion observée, distorsion qui s'accentue beaucoup quand on tourne la lentille du mauvais côté.

Avec le miroir du télescope, étudié au voisinage du centre, on observait une légère distorsion en barillet (lorsqu'on diaphragmait par un trou assez petit), montrant qne les bords ont un rayon de courbure plus grand. On peut d'ailleurs perfectionner ce procédé de Foucault, qui est moins sensible que les autres, en utilisant les phénomènes de moiré indiqués précédemment. Le réseau de photogravure, éclairé par derrière par une glace platinée, est placé de façon que son image dans le miroir vienne se former tout contre lui. En plaçant l'œil derrière la glace platinée, les larges franges grises obtenues indiquent aussitôt que le miroir n'est pas sphérique.

2° Comme exemple simple d'application du second procédé de Foucault (étude des sections du faisceau à étudier) on peut se contenter de renvoyer sur le plafond, par exemple, deux faisceaux provenant d'une source très petite et très brillante (arc un peu loin) et qui se sont réfléchis sur deux miroirs argentés : l'un est une portion de vitre commune, l'autre un morceau de glace de Saint-Gobain déjà très plane. Ce procédé de Foucault a été appliqué au télescope (étude des images d'un point lumineux près du centre et d'un point éloigné) en observant, en deçà et au delà de la partie la plus étroite du faisceau réfléchi, avec l'oculaire lui-même du télescope.

3° Enfin, l'expérience même du troisième procédé de Foucault (examen de la surface lorsqu'on intercepte l'image par un écran) est disposée à la séance : un trou de $0^{mm},15$ de diamètre environ est pratiqué dans une mince feuille de métal; sur ce trou, on forme l'image du filament d'une lampe Nernst, les rayons étant réfléchis par un petit prisme à réflexion totale et concentrés par une petite lentille collée sur le prisme. Tout l'ensemble est solidaire de la petite lanterne renfermant la lampe et l'on peut alors commodément orienter le faisceau provenant du point lumineux obtenu de façon à éclairer le miroir, qui est laissé dans le télescope (on a seulement retiré la plaque mobile portant l'oculaire et le prisme). Le point lumineux obtenu étant placé près du centre, on a placé l'écran mobile (porté par le chariot d'un appareil de Desains pour l'étude des anneaux de Newton) de façon à intercepter progressivement le faisceau près de l'image.

Comme ici le miroir est argenté, on peut placer au delà une chambre noire sans objectif sur le verre dépoli de laquelle vient se former une image suffisamment nette du miroir, ce qui permet d'observer commodément et de photographier les apparences observées. Celles-ci varient avec la position de l'écran interceptant le faisceau. On obtient sans difficulté celles sur lesquelles Foucault a insisté, qui donnent nettement l'apparence d'une surface en relief et qui mettent directement en évidence l'écart existant entre la surface réelle et celle qui fournirait, au point où se trouve le bord de l'écran, une image parfaite.

L'expérience ainsi disposée montre seulement que le miroir n'est plus sphérique, en reproduisant à peu près les apparences observées lors du travail progressif de la surface. Foucault ne dirigeait pas ce travail de façon à obtenir une surface exactement parabolique : au moins, pour un certain nombre des instruments qu'il a construits, il tenait compte du rôle joué dans les observations visuelles par l'oculaire, qui n'est pas lui-même parfait. Il cherchait à améliorer autant que possible, non pas l'image formée au plan focal du miroir, mais celle obtenue après le passage des rayons dans la partie fixe du microscope oculaire (à 4 verres), c'est-à-dire après l'objectif de celui-ci. C'est bien le cas, semble-t-il, de l'instrument présenté : M. Cotton a, en effet, étudié le télescope complet par ce procédé, en employant comme étoile artificielle le point lumineux de l'expérience précédente, placé à 40^m, et employant un artifice consistant à examiner à la loupe le *disque oculaire* du télescope. Bien que les appareils placés sur le trajet des rayons gênent alors les observations par la diffraction qu'ils produisent, on a pu constater nettement que l'extinction de l'anneau oculaire ne se fait pas uniformément lorsque l'écran est dans le plan focal du miroir, tandis qu'elle est beaucoup plus brusque lorsque l'écran mobile est en arrière de l'objectif du microscope oculaire.

Dans toutes les observations faites sur ce télescope, le rôle, très important, joué par l'état de la colonne d'air traversé par les rayons apparaît du premier coup. On met directement en évidence, par les procédés précédents, les différences d'indices de l'air chaud et de l'air froid, etc. (expériences de Töpler, Wood, etc.). Dans les expériences faites par le second procédé, avec le trou servant d'étoile artificielle, il suffisait de placer la main au-dessous du faisceau pour voir apparaître des stries ondoyantes très nettes dans le disque observé à quelque distance de la mise au point exacte. Avec le montage, installé à la séance, du dernier procédé de Foucault, on voit sans aucune difficulté le passage des gaz chauds provenant d'une lampe placée en dessous, bien que le miroir ne soit pas sphérique, et que, pour cette expérience, une simple lentille de myope argentée conviendrait tout aussi bien.

Lois d'action des diastases, par M. Victor Henri. — 1° Toutes les diastases possèdent les propriétés générales suivantes :

a. Chaque diastase agit sur des corps bien déterminés; dans beaucoup de cas il a été possible d'établir une relation entre les propriétés stéréochimiques des corps qui sont attaqués par une diastase donnée.

b. Toutes les diastases forment des solutions colloïdales.

c. Il y a une disproportion énorme entre la quantité d'une diastase et la quantité de corps qui peut être transformée par une diastase donnée; ainsi, par exemple, on peut avec 1^{mg} d'invertine transformer 20^g de saccharose en un mélange de glucose et de lévulose.

d. Les diastases ne s'affaiblissent pas pendant leur action, elles apparaissent donc à ce point de vue comme indestructibles.

Ces propriétés générales montrent que les actions diastasiques font partie du groupe des actions catalytiques produites par les colloïdes. Il y a donc intérêt à étudier en détail les lois d'action des réactions catalytiques pro-

duites par des colloïdes; cette étude a été entreprise par Bredig, il y a déjà quatre ans.

2° Lorsqu'on étudie les actions diastasiques on observe les caractères suivants :

a. Les réactions diastasiques sont lentes; ce ne sont pas des réactions instantanées, il y a donc lieu d'étudier la courbe qui exprime la vitesse de ces réactions. L'auteur a montré que l'on trouve des courbes qui sont dans certains cas (invertine, maltase) plus rapides qu'une logarithmique simple; dans d'autres cas, au contraire, on trouve des courbes plus lentes (par exemple pour l'action de l'émulsine).

b. La vitesse initiale d'une réaction diastasique dépend de la concentration du corps à transformer; M. Victor Henri a établi, il y a deux ans, que cette relation est de la forme suivante :

$$\text{vitesse initiale} = \frac{na}{1 + ma},$$

dans laquelle n et m sont deux constantes et a la concentration du corps sur lequel agit la diastase.

c. Les produits d'une réaction diastasique ralentissent cette réaction.

d. Un grand nombre de corps solubles agissent sur la vitesse d'action d'une diastase, certains l'accélèrent, d'autres la ralentissent; parmi ces corps il en existe un certain nombre qui agissent à des doses extrêmement faibles, on les désigne par le nom de *poisons*.

3° Dans l'histoire de l'étude théorique des lois d'action des diastases on peut distinguer trois phases :

a. Au début on a comparé les actions diastasiques à des réactions chimiques se produisant dans un milieu homogène.

b. Ensuite on les a comparées à des actions catalytiques se produisant en milieu homogène.

c. Enfin on les rapproche maintenant des réactions catalytiques se produisant dans des milieux hétérogènes. C'est cette dernière question que nous examinerons.

4° Il y a un an (26 janvier 1904) Nernst a publié quelques considérations théoriques sur la vitesse des réactions chimiques se produisant dans des milieux hétérogènes. Lorsque la réaction a lieu seulement au contact de deux phases, par exemple l'attaque d'un métal par un acide, le processus total se décompose en trois parties : α, diffusion de l'un des corps vers la surface de séparation entre les deux phases; β, transformation s'accomplissant à cet endroit; γ, diffusion au dehors des corps qui apparaissent.

Nernst suppose que dans beaucoup de réactions le processus β est très rapide, pour ainsi dire instantané; la vitesse de la réaction ne dépendra donc que de la vitesse de diffusion. Le problème de Cinétique chimique se trouve donc ainsi ramené à un problème physique de vitesse de diffusion.

Si l'on désigne par x la concentration au moment t du corps qui se transforme, la vitesse de la réaction sera représentée par la formule :

$$-\frac{dx}{dt} = \frac{DS}{\delta} x,$$

par conséquent on a, en posant $K_1 = \frac{DS}{\delta}$,

$$x = a.e^{-K_1 t}.$$

Dans l'expression précédente D est le coefficient de diffusion du corps qui réagit, S la surface de séparation des deux phases, δ l'épaisseur de la

couche de diffusion, c'est-à-dire l'épaisseur de la couche dans laquelle la concentration est variable.

Cette loi exponentielle a été vérifiée par Brunner pour un grand nombre de réactions différentes,

5° La théorie précédente a été admise par plusieurs auteurs comme directement applicable aux réactions catalytiques produites par des colloïdes. Nous pouvons faire dans ces cas des calculs approximatifs pour voir si la théorie de Nernst peut être appliquée directement à ces réactions. Prenons deux exemples.

Premier exemple. — 50^{cm^3} d'une solution de sucre à 10 pour 100 contiennent 1^{mg} d'invertine sèche; la vitesse d'hydrolyse donne pour K calculé d'après la formule exponentielle $K = 0,002$. On peut calculer approximativement la surface totale des granules colloïdaux, dont est composée la solution d'invertine; supposons que le diamètre des granules est compris entre $\frac{1}{10}$ et $\frac{1}{100}$ de μ; dans ce cas on trouve que la surface totale de tous les granules est comprise entre 600^{cm^2} et 6000^{cm^2}; et la distance moyenne entre deux granules est entre $3^{\mu},6$ et $0^{\mu},36$.

La constante de diffusion du sucre est environ égale à $D = 10^{-5}$ cm : sec, donc 60.10^{-5} cm : min. Par conséquent, si l'on suppose que la réaction se produit sur la surface des granules et qu'elle est instantanée, on devrait avoir :

$$K = \frac{DS}{\delta},$$

c'est-à-dire :

$$0,002 = \frac{0,36}{\delta},$$

d'où l'on déduit $\delta = 180^{cm}$.

Par conséquent, il est inexact d'admettre que la réaction se ramène à une diffusion du sucre du liquide intergranulaire vers les granules; il y a un deuxième processus lent qui se surajoute à ce premier.

Deuxième exemple. — Dans une expérience de Bredig nous trouvons que, en mettant dans 50^{cm^3} d'une solution d'eau oxygénée $0^{mg},3$ de platine colloïdal, il trouve :

$$K = 0,02.$$

Un calcul fait, en supposant que les granules de platine ont $\frac{1}{10}$ de μ de diamètre, montre que la surface totale des granules est égale à 12^{cm^2}, et que la distance moyenne de deux granules est égale à 10^{μ}; pour obtenir une réaction se produisant avec la vitesse observée par Bredig par la diffusion seule de l'eau oxygénée vers les granules, on devrait avoir $\delta = 3^{mm},6$; c'est-à-dire que, autour de chaque granule, devrait se trouver une zone de concentration variable dont l'épaisseur devrait être égale à $3^{mm},6$; donc 360 fois supérieure à la distance moyenne de deux granules.

Nous voyons donc que les réactions catalytiques produites par les colloïdes ne peuvent pas être considérées comme se ramenant à un simple processus de diffusion du corps réagissant vers la surface des granules colloïdaux. Nous devons admettre l'existence d'un deuxième processus lent, par exemple admettre que la réaction au contact des deux phases ou dans l'intérieur de l'une d'elles (à l'intérieur des granules) est lente.

6° L'hypothèse à laquelle nous sommes amenés peut être exprimée mathématiquement. Soient, au moment t, x la concentration du corps qui se transforme au dehors, dans le liquide intergranulaire, y sa concentration au contact immédiat ou dans l'intérieur des granules, là où se fait la transformation.

Si la réaction elle-même est monomoléculaire on aura les deux relations suivantes :

(1) $$-\frac{dy}{dt} = Ky,$$ vitesse de la réaction elle-même,

(2) $$-\frac{dx}{dt} = K_1(x-y),$$ vitesse de la diffusion.

En différentiant la deuxième équation et en substituant les valeurs de $\frac{dx}{dt}$ et $\frac{dy}{dt}$ on obtient l'équation :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (K + K_1)\frac{dx}{dt} + KK_1 x = 0.$$

Donc l'intégrale générale des équations (1) et (2) est

$$x = c_1 e^{-Kt} + c_2 e^{-K_1 t}.$$

Au début, pour $t = 0$, on a $x = a$, concentration initiale; donc

$$c_1 + c_2 = a.$$

De plus, pour les diastases, la vitesse initiale est de la forme

$$\frac{a}{1 + ma},$$

donc, pour $t = 0$,

$$-\frac{dx}{dt} = \frac{a}{1 + ma};$$

par conséquent,

$$Kc_1 + K_1 c_2 = \frac{a}{1 + ma}.$$

La formule définitive qui exprime l'action des diastases est donc :

$$x = \frac{a}{K_1 - K}[(K_1 - A)e^{-Kt} - (K - A)e^{-K_1 t}];$$

dans cette formule,

$$A = \frac{1}{1 + ma}.$$

On voit immédiatement que pour K_1 très grand (diffusion très rapide) la formule précédente devient $x = ae^{-Kt}$; de même pour K très grand (réaction instantanée) on a $x = ae^{-K_1 t}$.

De plus, si l'on admet que K_1 est plus grand que K, lorsque K sera $> A$ on aura une courbe plus lente que la logarithmique (c'est le cas de l'émulsine); si, au contraire, $K < A$, la courbe sera plus rapide qu'une logarithmique (c'est le cas de l'invertine et de la maltase).

M. Victor Henri montrera, dans une prochaine Communication expérimentale, comment les différentes expériences peuvent être représentées par la formule précédente.

7° On voit donc que la loi générale d'une réaction se produisant en milieu hétérogène a pour expression :

$$x = c_1 e^{-Kt} + c_2 e^{-K_1 t}$$

avec la restriction

$$c_1 + c_2 = a.$$

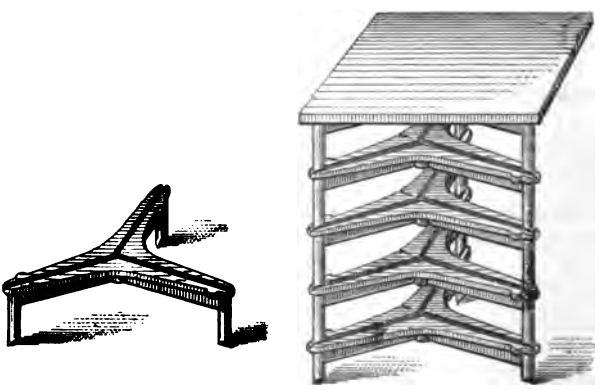
On se demande que signifie, dans le cas des diastases, l'expression de la vitesse initiale :

$$-\frac{dx}{dt} = \frac{a}{1 + ma};$$

quelle est la représentation physique qui nous permet d'interpréter cette expression?

Nous devons rapprocher les actions diastasiques des phénomènes d'absorption étudiés pour différents colloïdes par de nombreux auteurs; ces recherches montrent que tout corps soluble additionné à une solution colloïdale se répartit entre les granules et le liquide intergranulaire; lorsqu'on augmente la concentration du corps dehors, la concentration dans les granules augmente d'abord rapidement et ensuite de plus en plus lentement; la courbe d'absorption obtenue en portant en abscisses les concentrations dans le liquide intergranulaire et en ordonnées les concentrations dans les granules est identique à celle qui relie la vitesse initiale de l'action d'une diastase à la concentration du corps à transformer. Nous admettrons donc que le corps transformé par la diastase se répartit entre les granules et le liquide intergranulaire suivant la loi générale d'absorption des colloïdes. Nous verrons comment cette hypothèse pourra être vérifiée par des expériences dans lesquelles on étudie l'action de différents colloïdes sur la vitesse des réactions diastasiques.

M. Abraham présente à la Société un modèle de supports pour appareils de physique, qui a été combiné par M. C.-V. Boys et construit par la Scientific instrument C°, de Cambridge.



Ce sont des trépieds en fonte ou en bronze, ayant soit $7^{cm},5$ de rayon et une hauteur de $2^{cm},5$ ou de $7^{cm},5$; soit $17^{cm},5$ de rayon et une hauteur de $3^{cm},6$ ou de $7^{cm},6$. Des rainures radiales sont ménagées dans leurs faces supérieures, pour recevoir les vis calantes des appareils. On peut aussi visser un plateau sur ces trépieds.

Pour obtenir un support de hauteur quelconque, il suffit de placer un certain nombre de trépieds les uns sur les autres comme le montre la figure ci-contre. Grâce à l'emboîtement des pieds dans les rainures, la stabilité du support est extrêmement remarquable.

Le prix de revient de ces supports est insignifiant, une fois le modèle établi. Ils semblent pouvoir rendre de très réels services dans tous les laboratoires.

SÉANCE DU 7 AVRIL 1905.

PRÉSIDENCE DE M. E.-H. AMAGAT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 17 mars est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MMlles AMIEUX, Professeur aux Lycées Lamartine et Victor-Hugo, à Paris;
BOUE, Professeur au Lycée de jeunes filles du Havre;
DETCHEBARNE, Professeur au Lycée de jeunes filles de Toulouse;
DUPLAND, Professeur à l'Ecole Normale d'Institutrices de Privas;
ROZET, Professeur au Lycée de jeunes filles du Havre;
Mme REY, Professeur au Lycée de jeunes filles de Tours;
MM. ADAM, Professeur au Collège de Calais;
AUDINES, Professeur au Lycée de Tournon;
BACHELIER (G.), Chargé de Cours au Lycée de Coutances;
BADONNEL, Professeur au Lycée de Besançon;
BESSON (CH.), Professeur au Collège de Saint-Dié;
BIRHANS, Préparateur de physique au Lycée Henri-IV, Paris;
BLOCH (Moïse), Professeur au Lycée de Belfort;
CAUSSE, Professeur au Collège de Brive;
CHRÉTIEN (A.), Professeur au Lycée de Cherbourg;
CORNAILLE, Professeur au Lycée d'Arras;
COUDRY, Professeur au Lycée de Mâcon;
DAUJAT, Professeur à l'Ecole Normale de Châteauroux;
DAUZÈRE, Professeur au Lycée d'Agen;
DÉCOULX, Professeur au Collège de La Fère;
DERVIEUX, Professeur au Collège de Sézanne;
FAILLON, Professeur au Collège de Châtellerault;
FESQUET, Professeur au Lycée de Dunkerque;
GALLIE, Professeur au Collège de Mortain;
GARCIN, Radiographe des Hôpitaux, à Nîmes;
GAUTHIER, Professeur au Lycée de Bourg;
JARIAS, Chargé de Cours au Lycée de Pau;
KUNTZMANN, Professeur au Collège de Pont-à-Mousson;
LASSERRE, Professeur au Lycée d'Alger;
LEBEUF, Directeur de l'Observatoire de Besançon;
LETELLIER, Professeur au Lycée de Tours;
MONDAIN, Docteur en Médecine, au Havre;
MOUCHEL, Professeur au Lycée d'Elbeuf;
MUTEL, Professeur au Lycée de Nancy;
PIEUX, Professeur à l'École Normale d'Albertville;
REGNIER, Constructeur d'instruments de Physique et de Chimie, à Paris;
RÉMY, Professeur au Lycée de Rennes;
RODALLEC, Professeur au Collège de Morlaix;
SALVAING, Professeur au Collège de Saint-Yrieix;

le cinquantième de minute par lecture isolée; ce cercle, mobile autour d'un axe horizontal O, porte un miroir n normal au rayon du cercle passant en son milieu. Le sextant est placé de telle sorte que son axe O' soit parallèle à l'axe O; une lunette autocollimatrice L permet d'orienter le miroir n, de sorte que l'angle nON soit égal à l'angle NOL; si l'on fait tourner M d'un angle α, n tourne d'un angle double 2α.

Le parallélisme des axes O et O' n'a besoin d'être réalisé qu'à quelques minutes près, il est assuré par une lunette autocollimatrice dont l'axe optique est confondu avec l'axe de rotation de l'appareil et par un miroir auxiliaire que l'on règle normal à l'axe du sextant en même temps que l'on amène les axes au parallélisme en déplaçant le support du sextant.

Le cercle de l'appareil vérificateur peut être lié à un prisme à 5 faces dont les arêtes sont parallèles à l'axe qui, d'ailleurs, peut tourner indépendamment de lui et qui est destiné à faire le tarage de l'instrument. Une lunette autocollimatrice permet d'orienter les faces du prisme.

Soient A, B, C, D, E les faces et soient 60, 50, 57, 73 les angles supplémentaires de ceux des faces.

Si le prisme est placé de façon à ce que l'autocollimation soit établie sur A et si l'on tourne le cercle de façon à l'amener sur B, le cercle aura tourné de 60° dans un sens, il en sera de même pour tous les autres angles de faces et l'on pourra former le Tableau suivant :

(AB).....	60°
(BC).....	50°
(CD).....	57°
(DE).....	73°

Si donc on fait les opérations (AB) et (BC) en sens inverse, on aura tourné de $60° - 50° = 10°$.

De même on aura

$$(AB) - (CD) \text{ font } 60° - 57° = 3°,$$
$$(AB) - (DE) \text{ » } 60° - 73° = -13°,$$
$$(BC) - (CD) \text{ » } 50° - 57° = -7°.$$

On pourra faire défiler devant les microscopes des angles de 1°, 2°, 3°, 7°, 10°, etc. environ, toujours les mêmes et par suite faire l'étude du cercle.

Cette méthode est générale et se prête à la vérification de tous les cercles, à condition qu'on puisse déplacer le prisme indépendamment du cercle ou de l'alidade, et ceci est toujours réalisable. La lunette peut être indépendante du cercle, il suffit qu'elle soit stable.

L'appareil a été construit par M. Jobin.

Sur le spectre d'émission de l'arc électrique à haute tension; Note de M. DE KOWALSKI. — A la séance du 9 février 1904, j'ai eu l'honneur de présenter les résultats de mes expériences sur l'arc électrique jaillissant entre électrodes métalliques à haute tension et de démontrer qu'il existait un accord entre ces expériences et la théorie de M. Stark.

Je me permets de rappeler que, d'après M. Stark, l'arc électrique commence à se produire au moment où la température de la surface de la cathode est assez haute pour produire une sorte d'évaporation du métal de la cathode. On pouvait donc s'attendre à ce qu'aux environs de la cathode l'aspect du spectre lumineux de l'arc influencé par les vapeurs métalliques serait différent du spectre aux environs de l'anode. Il était

aussi très intéressant d'étudier l'influence qu'aurait l'intensité du courant dans l'arc sur l'aspect de ce spectre.

J'ai entrepris dans ce but de nouvelles expériences dont j'ai l'honneur de présenter ici les résultats. N'ayant pas à ma disposition les machines à courant continu à haute tension j'ai été obligé d'employer à leur place des

Fig. 1.

Fig. 2.

Fig. 3.

bobines d'induction. Pour obtenir un arc jaillissant entre électrodes métalliques avec l'anode et la cathode nettement définies il faut que le courant d'une bobine soit suffisamment dissymétrique, mais il est facile d'y arriver en employant un interrupteur approprié. Un interrupteur Deprez, par exemple, peut très bien servir, mais ce sont surtout les interrupteurs rotatifs à turbine avec jet de mercure qui répondent le mieux aux conditions de l'expérience. Nous en avons employé un de l'*Allgemeine Electricitäts Gesellschaft de Berlin*. Cet interrupteur a l'avantage de permettre d'employer les courants très intenses et de mesurer exactement le nombre d'interruptions.

Les photographies des spectres ont été obtenues au moyen d'un spectrographe à lentille de quartz et à prisme de Cornu.

Voici quelle était la disposition des expériences :

A une distance d'environ 20^{cm} à 25^{cm} de la fente du spectrographe était placé le spectro-déflagrateur avec des électrodes en cadmium ou en zinc. Le spectro-déflagrateur était relié au secondaire de la bobine d'induction, la distance des électrodes était d'environ 15^{mm}.

Dans ces conditions on obtenait une décharge à arc avec environ 20 interruptions par seconde et un courant de 6 ampères dans la bobine primaire.

Pour avoir un spectre de comparaison on mettait une batterie de condensateurs de 0,003 microfarad de capacité, en parallèle avec le déflagrateur. La décharge se transformait alors en décharge oscillante par étincelles.

Le spectre de cette dernière décharge est suffisamment connu, grâce aux belles recherches de M. Hemsalech, et pouvait être employé comme spectre de comparaison.

Les résultats obtenus ont confirmé nos prévisions et sont illustrés par les photographies ci-jointes.

Elles présentent d'abord un spectre à bandes dues aux vapeurs nitreuses qui se forment dans l'arc. Mais du côté de la cathode en haut on remarque en outre des fortes *lignes coupées,* dues au métal formant la cathode. Ces lignes apparaissent exclusivement à la cathode. Nous l'avons vérifié en inversant le courant. Elles apparaissent alors au bas du cliché.

La longueur de ces lignes dépend de l'intensité du courant dans l'arc. On l'aperçoit en étudiant les photographies n°s 1, 2 et 3. Tandis que la photographie n° 1 a été obtenue avec une intensité primaire de 10 ampères, la photographie n° 2 correspond à une intensité de 7 ampères et la photographie n° 3 à une intensité de 20 ampères. Cette dernière photographie prouve qu'en augmentant l'intensité, certaines lignes traversent toute la hauteur du spectre en s'élargissant du côté de la cathode. L'étude de la position de ces *lignes coupées* nous donne des résultats que je crois très intéressants.

Pour le cadmium nous observons les lignes suivantes :

5086			
4800			
4678			
3610	une double	3466	une double
3613		3467	
3404			
3261			

Pour le zinc :

4811	
4722	
4680	
3345	une double
3303	une double
3282	
2075	

Or ces lignes se trouvent être celles mêmes que M. de Watteville avait trouvées dans son remarquable travail sur les spectres des flammes.

Elles sont identiques avec les lignes caractéristiques pour le spectre des métaux évaporés dans le cône de la flamme.

Je tiens à faire remarquer que la ligne 3282 très faible dans la flamme du zinc apparaît d'une manière très nette dans notre spectre. Tous les faits démontrent donc définitivement l'existence des vapeurs métalliques aux

environs de la cathode et cela dans un état et à une température analogues à ceux que nous trouvons dans le cône d'une flamme à gaz.

En terminant, je désirerais remercier M. Paul Joye, mon assistant, qui m'a apporté les plus utiles contributions pour ce travail.

SÉANCE ANNUELLE.

JEUDI 27, VENDREDI 28 ET SAMEDI 29 AVRIL 1905,

à 8 heures du soir.

EXPOSITION.

Éclairage du vestibule avec les lampes à vapeur de mercure de.....	**M. Cooper Hewitt.**
Salle du Conseil. — Eclairage avec les lampes **Nernst** de la	**Société française d'Electricité A. E. G.**
Salle du rez-de-chaussée et salle d'entrée du 1er étage. — Eclairage avec nouvelles lampes à flamme (charbons Siemens) de.....	**M. Richard-Heller.**
Le courant continu fourni aux Exposants est produit par un alterno-redresseur **Rougé-Faget**, et distribué par des accumulateurs de la.....	**Société anonyme pour le travail électrique des métaux.**
Nouvelles bobines « Ella », modèles de 60cm, 15cm et 5cm d'étincelle; nouveau matériel radiographique pour ces bobines. — Appareils « Ella » de haute fréquence et appareillage complet pour expériences de cours sur ces courants : grand modèle de transformateur « Ella » pour bobines de 50cm d'étincelle, à isolement dans l'huile, et petit modèle de transformateur, à isolement par l'air, pour bobines de 5cm à 30cm d'étincelle. — Nouveau transformateur « Ella » à grand rendement pour alimentation des bobines directement sur les secteurs alternatifs, pour le cautère et pour expériences. — Convertisseur « Ella » à double bobinage pour médecins, transformant le courant continu des secteurs ou d'une batterie d'accumulateurs en courant alternatif sinusoïdal. — Spectrographe « Ella » pour l'éclipse du 30 août 1905. — Nouveaux cohéreurs « Ella » pour télégraphie sans fil.....	**M. Louis Ancel.**
Appareil de démonstration de la transformation des vibrations en travail mécanique.....	**Appareillage électrique Grivolas.**

Différentes substances radioactives, en particulier des sels de radium et appareils spécialement étudiés pour l'utilisation de ces sels. (Prise de potentiel, appareils pour applications thérapeutiques). — Nouvel électroscope pour la recherche des minéraux radioactifs. — Substances phosphorescentes avec écrans ..... **M. Armet de Lisle.**

Thermomètres pour très basses températures (—200°)..... **M. Louis Baudin.**

Calorimètre de Bunsen modifié, pour projections de M. **V. Crémieu.** — Soupape à mercure de M. l'abbé **Varin.** — Avertisseur automatique d'oxyde de carbone de M. **Albert Lévy** et **Pécoul.** — Appareils divers..... **M. Berlemont.**

Voltmètres et ampèremètres thermiques fixes et portatifs pour la mesure des courants alternatifs. — Voltmètres et ampèremètres magnétodynamiques apériodiques fixes et portatifs pour la mesure des courants continus. — Voltmètres et ampèremètres électromagnétiques pour la mesure des courants continus grands et petits modèles. — Galvanomètre à cadre mobile, modèle mural à miroir avec et sans épanouissement. — Galvanomètre Thomson simple sur trépied articulé portatif. — Galvanoscope..... **Maison Bréguet.**

Becs à gaz et à acétylène en stéatite. — Bec **L.-M. Bullier.** — Pièces isolantes pour courant à haute et basse tension. — Pièces pour l'automobile et la petite mécanique. — Appareil générateur de gaz acétylène. — Appareil épurateur... **M. L.-M. Bullier.**

Appareil ayant servi à MM. **Macé de Lépinay** et **H. Buisson** pour mesurer le volume des cubes relatifs au kilogramme. **M. H. Buisson.**

Condensateurs industriels système **Moscicki** fabriqués par M. **J. de Modzelwski**, de Fribourg..... **M. E.-H. Cadiot.**

Nouveau modèle de spectrographe à réseau de diffraction moulé donnant des spectres normaux de 18^{cm} d'étendue et permettant l'enregistrement direct des courbes de noircissement sur les clichés obtenus. — Clichés spectrographiques exécutés sur diverses marques récentes de plaques panchromatiques montrant leur sensibilité respective aux radiations peu réfrangibles. — Ecrans colorés, monochromatiques et autres, pour diverses applications (éclairage inactinique, photographie des couleurs, etc.). — Nouveau vide-touries pneumatique..... **M. H. Calmels.**

Voltmètres et ampèremètres à double face pour courant continu et alternatif. — Voltmètres et ampèremètres à cadre mobile pour tableaux. — Voltmètre, ampèremètre et wattmètre thermiques pour circuits à haute tension. — Polythermique : appareil pour la mesure des différences de potentiel, des intensités, des puissances et des différences phase. — Boîte de contrôle pour courant continu. — Galvanomètre mural à échelle transparente à grande sensibilité. — Relais d'induction **Schneider-Carpentier** pour l'étude des points critiques. — Boîte de résistances, modèle **Nugues-Carpentier.** — Microélectroscope **Wilson** pour l'étude des corps radioactifs. — Interrupteur Wehnelt à circulation. — Rupteur **Carpentier** pour l'alimentation des bobines par courant alternatif. — Appareils pour la mesure des bases par la méthode de MM. **Benoit** et **Guillaume**..... **M. J. Carpentier.**

Galvanomètre thermique universel. — Wattmètre à cadran pour tableaux. — Wattmètre enregistreur pour courants alternatifs. — Modèle pour hautes tensions. — Nouveau

pyromètre thermo-électrique. — Mégohmmètre. — Appareils divers ..... MM. **Chauvin** et **Arnoux**.

Appareil de démonstration pour télégraphie sans fil à cadrans Bréguet ..... M. **E. Chomeau**.

Balance de haute précision de la portée de 10^g, destinée au Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers ..... M. **A. Collot**.

Horloge à contact. Compteur à indicateur de tarif maximum. — Compteur triphasé d'induction. — Compteur pour tramway ..... Cie française des compteurs **Aron**.

Photomètre **Simmance-Abbady**, destiné à photométrer sur tous les angles. — Télescope pyrométrique universel de M. **Ch. Féry** et galvanomètre **Meylan-d'Arsonval**. — Enregistreur pyrométrique de M. **Ch. Féry**. — Fluxmètre système **Grassot**. — Wattmètre enregistreur circuit triphasé système **Meylan-d'Arsonval**. — Wattmètre enregistreur de 5000 ampères courant continu et alternatif, système **Meylan-d'Arsonval**.— Fréquence-mètre système **Meylan-d'Arsonval**. — Appareils de mesures à double cadran lumineux pour lecture sur les deux faces. — Appareil enregistreur d'ions de M. **P. Langevin** ..... Cie pour la fabrication des compteurs et matériel d'usines à gaz.

Métroradiographie. — Photographie d'un groupe d'appareils réalisant : 1° La localisation des corps étrangers logés dans l'organisme; la mensuration du squelette et des organes rendus artificiellement apparents; 3° les examens radiographiques qualitatifs et quantitatifs (comme la tuberculose pulmonaire, les affections osseuses, etc.) ..... M. **Contremoulins**.

Vérants et bivérants de la maison **Zeiss**. — Microphotographies obtenues avec la lumière ultra-violette ($r = 275^{\mu\mu}$) par M. **Kohler**, de la maison **Zeiss** ..... M. **P. Culmann**.

Expériences sur le transport par le courant des particules ultra-microscopiques ..... MM. **Cotton** et **Mouton**.

Expérience de Wiedemann sur les relations entre l'aimantation, le courant électrique et la torsion ..... M. **P. Curie**.

Suspension horizontale indépendante pour montre « Torpilleur ». — Chronomètre non magnétique muni du nouveau balancier compensateur, système **Guillaume** ..... M. **Paul Ditishem**.

Orthodiographe du Dr **Destret**. — Appareil porte-ampoule, avec dispositif protecteur, porte-écran, diaphragme iris pour la radiographie en général ..... M. **L. Drault**.

Tubes et ampoules pour la radiographie ..... MM. **Drisler** et **Cie**.

Bobine de **Ruhmkorff** type transportable de grande puissance, de **E. Ducretet** (Télégraphie sans fil et rayons X) à double circuit inducteur. Actionnée par l'interrupteur électrolytique de **Wehnelt**, modèle **E. Ducretet**. — Récepteur **Popoff-Ducretet**, en service courant pour la Télégraphie sans fil aux grandes distances. Type 1904-1905 avec relais et radioconducteur de grande sensibilité et fixité. — Nouveau modèle **Ducretet** de récepteur **Morse** à encrage con-

tinu et à déclenchement automatique (T. S. F.). — Poste complet pour la Télégraphie sans fil par la terre ou par l'eau. — Poste microtéléphonique haut-parleur **R. Gaillard**, type 1904-1905, **Gaillard-Ducretet**, à organes indépendants. — Générateur tubulaire d'ozone, type **Ducretet**, à grand rendement pour les laboratoires industriels. Actionné soit par une bobine de **Ruhmkorff**, soit par un petit transformateur branché directement sur une distribution à courant alternatif..... **M. E. Ducretet.**

Dynamomètre totalisateur enregistreur de M. **Charles Henry**. — Quadrateur sphérique de M. **Henri Chrétien**. — Applications de l'anactinochrine β à l'éclairage des laboratoires de photographie. — Couleurs pigmentaires et interférentielles combinées de M. **Charles Henry**, spécimens et graphiques spectroscopiques. — Applications nouvelles du sulfure de zinc phosphorescent; écrans et clichés. — Anamorphoses polaires photographiques de M. **Henri Chrétien**. — Application des soies électriques de M. **Charles Henry** au drapage esthétique des modèles; clichés..... **Etablissements Goy.**

Appareil destiné à régulariser le fonctionnement des trompes à vide de M. **J. Meunier**..... **M. G. Fontaine.**

Thermo-régulateur. — Thermomètre à tension de vapeur saturée. — Lampe thermo-électrique à arc..... **M. J.-B. Fournier.**

Photographie du four d'essais du Laboratoire d'Issy-les-Moulineaux. — Creusets ayant servi aux différentes opérations. Produits obtenus : métaux, grès, verre, émaux..... **M. Gabreau.**

Appareillage pour la production des rayons X et des courants de haute fréquence, fonctionnant sans interrupteur. — Interrupteur à mercure autonome. — Nouveau pied support articulé. — Oscilloscope décelant la présence de courant alternatif dans un tube de Crookes. — Lampe **Leslie-Miller**, modèle **Gaiffe** pour la production des rayons ultra-violets avec son appareil compresseur taré. — Interrupteur de courant continu de M. le professeur **Leduc** mû à la main et au moteur. — Appareil **Truchot-Gaiffe** à mouvement alternatif pour la gymnastique musculaire. — Radiographie faite avec des tubes de différentes origines fonctionnant au même régime. en collaboration avec M. le Dr **Belot**. — Comparateur de quantité de rayon X, système de **Courtades**.. **M. G. Gaiffe.**

Poste cinématographique. — Chronophone, appareil combiné du phonographe et du cinématographe. — Stéréo-parallaxes d'**Yves**. — Block-notes. — Stéréo-Block-notes. — Spidos. — Stéréospidos et Stéréodromes (Stéréoscopes classiques)..... **M. L. Gaumont.**

Nouvelle magnéto. — Nouvelle bobine d'induction. — Distributeur d'allumage à réglage automatique..... **M. L. Gianoli.**

Parafoudre **Gola**..... **M. G. Goisot.**

Expériences pour l'étude de la fonction photographique..... **M. A. Guébhard.**

Nouvel électromètre..... **M. Guinchant.**

Tachymètre « James », nouvel indicateur de vitesse..... **MM. Hinstin frères.**

Modèle de taximètre (compteur horokilométrique pour voiture, système **A.-Paul Japy**..... **M. P. Japy.**

Comparateur de M. **Mesnager**, à deux microscopes à micromètre, pour l'étude des allongements de pièces en charge, jusqu'à 1m de longueur. — Appareil interférentiel de M. **Mesnager**. à deux miroirs, accotés ou en regard l'un de l'autre, pour l'étude des déplacements relatifs de points rapprochés de pièces métalliques ou maçonnerie en charge. — Appareil **Perot** et **Jobin** pour la vérification des sextants et cercles divisés verticaux, construit pour le Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers. — Photopolarimètre enregistreur de M. **Gaston Gaillard**. — Le mouvement continu du polarisateur, combiné à un mouvement d'oscillation convenable de l'analyseur, permet à cet appareil, par sa liaison avec un cinématographe, de suivre et d'enregistrer à des instants déterminés la rotation de corps actifs dans toutes les conditions où elle varie..... M. **A. Jobin**.

Déchargeur micrométrique pour hautes tensions. — Condensateur normal à air et autres types de laboratoire. — Appareil pour étudier l'influence de la température sur l'absorption de la lumière. — Radio-transmetteurs des charges électriques..... M. **de Kowalski**.

Appareil enregistreur d'ions..... M. **P. Langevin**.

Photomètre à papillotement à vitesse variable, destiné à montrer l'erreur d'appréciation due aux variations de la vitesse..... M. **Lauriol**.

Batteries portatives pour courant continu, courant induit, pour cautère et lumière. — Nouvel appareil faradique transportable ou à poste fixe, avec cadran divisé, pour lecture et repérage des vibrations. — Nouvelle plaque électrode en tissu spécial avec sachets interchangeables permettant d'avoir, pour chaque malade, une enveloppe personnelle. — Petits moteurs et dynamo pour secteurs, laboratoires et installations privées. — Etuves à stérilisation et autoclave pour stérilisation des ferments..... M. **G. Lézy**.

Chambre claire..... MM. **Lugol** et **Stiassnie**.

Nouveaux brûleurs de laboratoires et leur application au chauffage à température élevée. ..... M. **G. Méker**.

Nouveaux accumulateurs..... MM. **Méran frères**.

Banc de métallographie de M. **Le Chatelier**. — Nouveau galvanomètre enregistreur de M. **Le Chatelier** pour la mesure des températures. — Dynamomètre enregistreur de MM. **Pellin-Lacan**. — Pyromètre optique de M. **Féry**. — Etalon photométrique à acétylène de M. **Féry**. — Machine à diviser avec dispositif spécial pour la mesure de la distance des raies dans les photographies spectroscopiques..... M. **Ph. Pellin**.

Pompe à mercure à double effet avec chutes automatiques. — Uréomètre. — Gazomètre (construits par M. G. Fontaine). M. **E. Péroux**.

Stéréoscope pour la vision de photographies obtenues par la méthode interférentielle de M. **Lippmann**.— Double mouvement pour les oculaires construit par M. **Mackenstein**. M. **A. Ponsot**.

Fours électriques de laboratoire. — Différents modèles de fours à tube. — Four à mouvement vertical et horizontal. — Four à moufle. — Grille à analyses organiques. — Appareils en verre de quartz. — Lampe à arc au mercure en

verre de quartz. — Nouvelle burette de **G. Claude** pour le dosage rapide d'un mélange de deux gaz, et en général de plusieurs gaz..... **MM. Poulenc frères.**

Appareil universel de projection, modèle 1905. — Indicateur de vitesse de M. **Luc Denis**..... **MM. Radiguet** et **Massiot.**

Lampe à vapeur de mercure de M. **Cooper Hewitt**..... **M. de Recklinghausen.**

Nouveau régulateur de pression de M. **Villiers.** — Nouveau régulateur de température de M. **Villiers.** — Appareil cryoscopique de M. **Étard.** — Appareil de M. **Étard** pour l'étude des points de fusion. — Tubes spectroscopiques de M. **Etard.** — Uréomètre du Dr **Dupain.** — Echantillons de cémentation par le procédé **Lecarme**; séries de photographies micrographiques obtenues avec l'arc au mercure. — Modèles pour l'enseignement; modèle de tunnel; diverses phases de la construction. — Localisateur **Dean** pour la radiothérapie. — Appareil à cautères et lumière pour courant alternatif. — Appareil producteur de vibrations et de courants ondulatoires polyphasés. — Interrupteur à triple jet de mercure..... **M. J. Régnier.**

1. *Précision.* Nouvelle girouette anémométrique enregistrante, pointant la direction par l'impression d'une flèche sur une bande Morse chaque fois qu'il y a *n* mètres de vent passé. — Girouette enregistrante à papier sans fin. — Manomètre différentiel enregistreur à grande sensibilité pour la mesure du débit des conduites d'eau, système de MM. **Mesnager**; nouveau modèle à cames. — Nouveau trépidomètre enregistreur. — Balance de précision enregistrante. — 2. *Électricité.* Voltmètres apériodiques de 15cm. — Ampèremètres apériodiques de 10cm. — Voltmètres grande marche de 20cm. — Ampèremètres à apériodicité réglable de 18cm, courant alternatif. — Voltmètre à apériodicité réglable de 25cm. — Ampèremètres et voltmètres combinés pour automobiles. — Ampèremètre en boîte étanche de 15cm. — Voltmètre collerette antérieure. — Enregistreur à cylindre horizontal électro-magnétique. — Enregistreur à cadre pour véhicule. — Wattmètre enregistreur. — Boîte de contrôle de précision à cadran de 15cm. — Boîte de contrôle, modèle léger, à cadran de 10cm. — Ohmmètres. — Galvanomètres à grande résistance (800 par volt) pour essais de pile. — 3. *Photographie.* Le *Glyphoscope,* nouvel appareil simplifié pour la photographie stéréoscopique. — Perfectionnements apportés au vérascope : décentrement, modèle 7×13. — Nouveaux modèles de taxiphote : court foyer. — Cône stéréopostal : amplificateur de clichés du vérascope pour cartes postales. — Projection de diapositifs du vérascope à l'aide du taxiphote..... **M. Jules Richard.**

Collection d'instruments de démonstration pour écoles (ampèremètre, voltmètre, wattmètre, résistance, etc.). — Nouveau tachymètre. — Divers instruments de mesure nouveaux. — Appareillage, limiteurs de courant. — Orthodiagraphe. — Tableau universel médical avec transformateur de courant continu, et divers appareils d'électricité médicale. — Horloges électriques (Heller)..... **M. Richard-Heller.**

Clichés en couleurs obtenus par la méthode interférentielle sans miroir de mercure..... **M. Rothé.**

Nouvelles lampes à incandescence à filament de tantale. — Nouvel indicateur de vitesse électrique de M. **J. Carlier**. — Appareils de mesure.....	MM. **Ch. Rousselle** et **Tournaire**.
Transformateur pour l'obtention de courants de haute fréquence, permettant les effluves monopolaires et bipolaires avec gradation parfaite des effets. — Démonstration sur un appareil actionné par une machine électro-statique à 12 disques rigides à démontage instantané.....	M. **Roycourt**.
Photographies des ondes stationnaires produites au voisinage d'une ligne focale d'une lentille bi-réfringente. — Modèle schématique du dispositif expérimental.....	M. **G. Sagnac**.
Moteur dentaire suspendu à une potence extensible à poulies. — Tableau pour usage médical : cautères, air chaud, endoscopie. — Transformateur dévolteur pour courant continu, modèle fixe, modèle complet portatif, modèle pour courant alternatif. — Tableau de modèles de cautères à monture d'argent aseptisable. — Tableau de diagrammes de piles pour charge d'accumulateur. — Lampe pour l'examen de la gorge sans applique articulée.....	M. **A. de Sainville**.
Théodolite altazimutal. — Cercle méridien.....	M. **G. Secrétan**.
Le Monophone, appareil téléphonique hygiénique. — Magnéto et inflammateurs (système **Caron**) pour l'allumage des moteurs à explosion par arrachement électro-magnétique. — Nouveau système de protection des appareils téléphoniques et télégraphiques reliés à des lignes aériennes. — Système de protection **L. Neu** contre la rupture des fils de canalisation à haute tension. — Disjoncteur tripolaire à minima pour la protection des moteurs triphasés (système **L. Choulet**).....	**Société industrielle des Téléphones**.
Nécessaire pour les expériences sur l'air liquide à l'usage des Facultés, Lycées, Collèges, etc., avec expériences inédites.	**Société de l'air liquide**.
Installation complète pour l'étude des corps radioactifs (appareils de M. **P. Curie**) : Condensateur à plateaux. — Conducteur isolé. — Électromètre apériodique à fil de quartz, isolement à l'anchroïne. — Quartz piezoélectrique. — Électroscope nouveau modèle 1905. — Balance magnétique **Curie-Cheneveau**, nouveau modèle 1905. — Appareil de M. **de Kowalski** à plateau d'argent à amalgane de radium. — Émanation radioactive. — Appareil **Orsat** à 7 cloches, modifié par M. **A. Chatelin**.....	**Société centrale de Produits chimiques**.
Lampe **Nernst**, types courants. — Lampe à projection. — Lampe express. — Compteurs type oscillant, type avec tarification combinée, type avec pré-paiement.....	**Société française d'Electricité A. E. G.**
Nouveau matériel pour le soudage autogène du plomb et le soudage de l'étain des pièces délicates en cuivre. — Nouveau matériel pour projections lumineuses. — Nouveau matériel à réglage automatique pour la soudure autogène oxyhydrique.....	**Société l'Oxhydrique française**.

Appareils nouveaux. — Fer à souder marchant avec une batterie d'accumulateurs de 8 volts. — Nouvel accumulateur « Le Radium »	**Société le Chauffage par l'Electricité.**
Électrodensimètre de M. **Benoît**. — Arcs au mercure et au fer de M. **P. Villard**. — Interrupteur nouveau modèle de **P. Villard**. — Photographie stéréoscopique de rayons cathodiques, par M. **P. Villard**. — Appareil Cinégraphe compositeur de M. **L. Preux**. — Appareil à chloroformer de MM. **Dupont, Chabaud** et **Thurneyssen**	**M. J. Thurneyssen.**
Allumeur pour moteur à 4 cylindres	**M. R. Varret.**
Nouvelle balance à fléau court	**M. V.-J. Velter et Cie.**

EXPOSITION ANNEXE

AU MUSÉE PÉDAGOGIQUE, 41, RUE GAY-LUSSAC, 41.

(Matériel des Manipulations élémentaires de Physique).

LISTE DES EXPOSANTS.

MM. ADAM, Professeur au Lycée Voltaire, Paris.
ADAM, Professeur au Lycée Saint-Louis.
ANGEL, Ingénieur des Arts et Manufactures, Constructeur.
ANDRAULT, Professeur au Lycée de Gap.
ARNOUX, Ingénieur civil à Paris.
AUBERT, Professeur au Lycée de Bastia.
AUBERT (E.), Professeur au Lycée Charlemagne, Paris.
AUBERT (J.), Professeur au Lycée Condorcet.
AUDHUY (G.), Préparateur à la Faculté de Médecine de Bordeaux.
AUDIBERT, Professeur au Collège de Lodève.
AURIOL, Professeur à l'Ecole primaire supérieure de Lorient.
AUZEL, Professeur au Lycée de Rennes.
AVRONSART, Directeur de l'Ecole communale de Marquette (Nord).

BARRAL, Professeur au Collège de Vienne.
BASSAC, Professeur au Lycée de Marseille.
BASSET, Professeur au Lycée de Bourges.
BAUDIN, Constructeur à Paris.
BECKER, Préparateur au Collège Rollin.
Mlle BÉLUGOU, Directrice du Lycée de jeunes filles du Havre.
MM. BERGÉ, Professeur au Collège de Lunéville.
BERGONIÉ, Professeur à la Faculté de Médecine de Bordeaux.
BERNARD (L.), Professeur au Collège de Boulogne-sur-Mer.
BERTOUX, Professeur au Lycée de Douai.
BILLARD, Professeur au Lycée Charlemagne, Paris.
BLONDIN, Professeur au Collège Rollin, Paris.
BOLEY, Professeur au Lycée de Rennes.
BOUASSE, Professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse.
BOUCHER, Professeur au Collège de Saint-Servan.
Mlle BOUÉ, Professeur au Lycée de Jeunes Filles du Havre.
MM. BOUILHAC, Professeur au Lycée Louis-le-Grand.
BOUXIN, Professeur au Lycée de Toulouse.
BRAULT, Préparateur au Lycée d'Orléans.
BUGUET, Professeur au Lycée de Rouen.

MM. Camichel, Professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse.
Carimey, Professeur au Lycée Saint-Louis.
Causse, Professeur au Collège de Brive.
Chassagny, Professeur au Lycée Janson de Sailly, Paris.
Chauvin, Ingénieur-électricien à Paris.
Chomeau, Constructeur à Paris.
Chrétien, Professeur au Lycée de Saint-Brieuc.
Colardeau (E.), Professeur au Collège Rollin, Paris.
Colardeau (P.), Professeur au Lycée de Lille.
Colin, Professeur au Lycée Louis-le-Grand, Paris.
Cotton, Maître de conférences à l'Ecole normale supérieure de Paris.
Cussons (G.), Constructeur à Manchester (Angleterre).

Daujat, Professeur à l'École Normale de Châteauroux.
Damien, Professeur à l'Institut de Physique de la Faculté des Sciences de Lille.
Dauzère, Professeur au Lycée d'Agen.
Debrun, Professeur au Collège de Loudun.
Delvalez, Professeur au Lycée Condorcet.
Demerliac, Professeur au Lycée de Caen.
Demongeot, Professeur à l'École normale d'Amiens.
Descombes, Professeur au Lycée de Guéret.
Descout, Aide de Physique au Lycée de Poitiers.
Detaille, Professeur au Lycée de Saint-Brieuc.
Devaud, Professeur au Lycée de Marseille.
Dhuic, Professeur au Lycée de Reims.
Directeur de l'École primaire supérieure de La Flèche.
Directeur de l'École normale d'Instituteurs de Toulouse.
Ducretet, Constructeur à Paris.
Dufour, Professeur au Lycée Louis-le-Grand, Paris.
Duplaa, Professeur au Collège de Pamiers.
Dybowski, Professeur au Lycée Louis-le-Grand, Paris.

Eldin, Professeur à l'Ecole professionnelle Carnot à Vichy.
Errard, Professeur au Lycée de Troyes.

Fouque, Professeur au Lycée de Marseille.

Gallotti, Professeur au Lycée d'Orléans.
Garbe, Doyen de la Faculté des Sciences de Poitiers.
Givert, Professeur au Lycée de Caen.
Goasguien, Professeur au Lycée de Lorient.
Gomien, Professeur au Lycée de Toulouse.
Grau, Professeur au Lycée de Reims.
Greffe, Professeur au Lycée Henri-IV, Paris.
Guillard, Constructeur à Paris.
Guillaume (Ch.-Ed.), Directeur-adjoint du Bureau international des Poids et Mesures à Sèvres.
Guillin, Préparateur à la Faculté des Sciences de Besançon.
Guinchant, Professeur-adjoint à la Faculté des Sciences de Caen.

Haudié, Professeur à l'Ecole Navale de Brest.
Henry (A.), Professeur au Lycée de Reims.
Henry (E.), Professeur au Lycée de Lorient.
Herbelot, Professeur à l'Ecole industrielle d'Epinal.
Hulot, Préparateur au Lycée Saint-Louis, Paris.

Jarias, Chargé de cours au Lycée de Pau.
Joly, Professeur au Lycée de Marseille.

Knoll, Professeur délégué au Lycée Louis-le-Grand, Paris.

Labonne, Professeur à l'Ecole primaire supérieure de Belvès.
Laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de Toulouse.
— de Physique P. C. N. Faculté des Sciences de Rennes.
— de Physique du Lycée de Rennes.
Lamirand, Professeur au Lycée Saint-Louis.
Laniès, Professeur au Lycée de Toulouse.
Lapresté, Professeur au Lycée Buffon, Paris.

MM. Leblanc (René), Inspecteur général de l'Enseignement primaire.
Lees, Professeur à l'Université de Manchester (Angleterre).
Lefebvre, Professeur au Lycée de Douai.
Lemoine (J.), Professeur au Lycée Louis-le-Grand, Paris.
Lemoine, Préparateur au Collège Rollin.
Lenoir, Professeur au Lycée d'Alençon.
Lesobre, Professeur au Collège de Melun.
Lézy, Constructeur à Paris.
Lugol, Professeur au Lycée Condorcet.

Marie, Professeur au Collège de Vire.
Marie, Préparateur au Lycée Charlemagne, Paris.
Maistre, Préparateur au Lycée Voltaire, Paris.
Marnat, Préparateur au Lycée Buffon, Paris.
Marsoulier, Professeur au Lycée Henry-IV, Paris.
Mathieu, Professeur au Lycée d'Evreux.
Méchin, Professeur au Collège de Lunéville.
Meker, Ingénieur, Nogent-sur-Marne.
Merlin, Professeur au Collège de Châlons-sur-Marne.
Mermet, Professeur au Lycée Charlemagne, Paris.
Meyer (F.), Professeur au Collège Chaptal, Paris.
Meynier, Professeur au Lycée de Rouen.
Moreau, Professeur à la Faculté des Sciences de Rennes.
Morin, Professeur au Lycée de Montluçon.
Mlle Mourgues, Professeur au Lycée de Jeunes Filles Fénelon, Paris.
MM. Nondé, Instituteur-adjoint à l'École primaire supérieure de Decize.

Oneto, Professeur au Lycée de Marseille.

Pagès, Instituteur-adjoint à Saurat.
Paillot, Chef des Travaux pratiques à l'Institut de la Faculté des Sciences de Lille.
Panzani, Professeur au Lycée de Mont-de-Marsan.
Patte, Professeur au Lycée de Bar-le-Duc.
Pellat, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris.
Perreau, Professeur à la Faculté des Sciences de Besançon.
Perrin, Préparateur à la Faculté des Sciences de Grenoble.
Pessemesse, Chargé de cours au Lycée de Châteauroux.
Philippe, Professeur au Lycée de Bourges.
Poitevin, Préparateur au Lycée Charlemagne, Paris.
Preux, Professeur au Collège de Saint-Pol.
Pye, Constructeur à Cambridge (Angleterre).

Rivière, Professeur au Lycée Saint-Louis, Paris.
Rolland (E.), Professeur au Lycée de Poitiers.
Rothé, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Grenoble.
Roubault, Professeur au Lycée d'Angoulême.
Mlle Rozet, Professeur au Lycée de Jeunes Filles du Havre.
MM. Roques, Aide de Clinique à Bordeaux.
Roussel, Préparateur au Lycée de Troyes.

Saint-Cyr, Professeur au Lycée de Beauvais.
Sandoz, Préparateur de Physique à la Faculté de médecine de Paris.
Schuster, Professeur à l'Université de Manchester (Angleterre).
Searle G.-F.-C., Professeur à l'Université de Cambridge (Angleterre).
Sechétan, Constructeur, à Paris.
Schurr, Professeur au Lycée d'Agen.

Thiéry, Professeur au Collège de Péronne.
Tiersot, Constructeur à Paris.
Thouvenel, Professeur au Lycée Charlemagne, Paris.
Touren, Professeur au Collège Rollin.
Turpain, Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Poitiers.

Mlles Vasseur, Professeur à l'Ecole normale d'Institutrices d'Amiens.
Vautier, Professeur au Collège de Jeunes Filles de Laon.
MM. Vayssières, Professeur au Lycée de Carcassonne.
Vermeil, Professeur au Lycée de Nice.

MM. Vuillet, Professeur à l'Ecole normale de Grenoble.
Vernier, Professeur délégué au Lycée Louis-le-Grand, Paris.
Viard, Professeur au Lycée Louis-le-Grand, Paris.
Vieillot, Directeur de l'Ecole normale d'Instituteurs de Montpellier.
Vincent, Professeur au Lycée Saint-Louis, Paris.

Weiss (P.), Professeur à l'Ecole Polytechnique de Zurich (Suisse).
Weiss (G.), Professeur agrégé à la Faculté de Médecine, Paris.
Wund, Professeur au Collège Chaptal, Paris.

COMMUNICATIONS.

RÉUNIONS DES 27, 28 ET 29 AVRIL 1905.

Présidence de M. E.-H. Amagat.

Sur les tendances et les recherches actuelles de l'Électrotechnique; par M. P. Janet. — Dans cette conférence, l'auteur s'est proposé de montrer comment l'évolution générale des formes, des dimensions, des principes mêmes de nos machines ou appareils électriques a été naturellement imposée et amenée progressivement par une sorte d'action de milieu, c'est-à-dire par les besoins nouveaux qui apparaissaient au fur et à mesure que l'industrie électrique se développait.

Pour les génératrices, la nécessité d'élever la puissance et la tension, amène tout naturellement aux machines de grand diamètre à marche lente; le grand moment d'inertie des parties tournantes les fit confondre avec le volant des machines à vapeur et ainsi furent réalisés les groupes électrogènes dont la puissance s'élève actuellement jusqu'à 6000 kilowatts ou 7000 kilowatts.

L'apparition des turbines à vapeur à grande vitesse de rotation amena au contraire une grande réduction de diamètre avec allongement suivant l'axe et la force centrifuge extrêmement élevée à la périphérie.

Parmi les problèmes purement électriques soulevés par l'étude des génératrices, l'auteur signale, pour les dynamos à courant continu, la commutation sans étincelles sous les balais, et pour les alternateurs, le couplage en parallèle, le compoundage et la suppression des harmoniques.

Les stations génératrices modernes sont mues par l'eau, la vapeur ou le gaz; l'auteur examine des exemples de ces trois types d'installation.

Les grands transports à longue distance se font en général par courants triphasés à haute tension : on obtient 21000 volts en France, 40000 volts dans le nord de l'Italie, 50000 et plus aux Etats-Unis. D'intéressantes transmissions sont également faites par courant continu en série à haute tension.

Au point d'arrivée, l'utilisation mécanique de l'énergie électrique est la plus importante; parmi les moteurs, les moteurs à courant continu et les moteurs polyphasés sont aujourd'hui classiques. Les recherches les plus récentes ont porté sur les moteurs à courant alternatif simple et à collecteur.

Parmi ces applications mécaniques, la plus importante est celle de la traction : l'auteur signale les deux tendances qui se manifestent : emploi de trains composés de voitures toutes automotrices et emploi direct des hautes tensions.

Enfin l'auteur termine en signalant l'évolution actuelle de l'éclairage et la recherche de corps rayonnants plus économiques que le carbone, soit dans la lampe à arc, soit dans la lampe à incandescence.

Les propriétés magnétiques de la pyrrhotine et celles des corps ferromagnétiques en général. — M. Pierre Weiss décrit les propriétés magnétiques de la pyrrhotine. Cette substance, quelle que soit l'orientation du champ, ne s'aimante que dans le plan de base des cristaux qui semblent appartenir au prisme hexagonal.

Ce plan est donc un *plan magnétique*. La démonstration en est donnée au moyen d'un appareil qui permet de présenter une sphère de pyrrhotine à un aimant, le plan magnétique étant perpendiculaire ou parallèle aux lignes de force. Dans le premier cas il n'y a pas d'attraction, dans le deuxième l'attraction se fait sentir à plusieurs centimètres de distance.

Des mesures très exactes dans les champs très intenses ont montré, néanmoins, que la pyrrhotine possède une faible susceptibilité perpendiculaire au plan magnétique du même ordre de grandeur que celle des composés peu magnétiques du fer. *La pyrrhotine est donc ferromagnétique dans le plan magnétique et paramagnétique perpendiculairement à ce plan.*

La topographie des propriétés magnétiques de la pyrrothine dans le plan magnétique a montré que *cette substance est toujours formée par l'association de trois cristaux plus simples juxtaposés sous des angles de* 120° *et représentés avec une importance variable dans les divers échantillons.* La matière élémentaire n'ayant pu être isolée ses propriétés ont été déduites de celles de cristaux complexes dans lesquels l'un des éléments associés prédomine. Cette étude a montré que, *déduction faite d'un champ démagnétisant proportionnel à la composante de l'aimantation dans une direction fixe, la substance a des propriétés isotropes.* Dans le plan magnétique, ce champ démagnétisant atteint la valeur élevée de 7300 gauss.

Dans la direction perpendiculaire à celle où il agit, *l'aimantation atteint la saturation dès les champs les plus faibles et la conserve invariable jusqu'aux champs les plus élevés.*

Jusqu'à présent nous avons fait abstraction des phénomènes rémanents. On peut les décrire sommairement par les propositions : *Le long du cercle de saturation le champ coercitif est nul. Le champ coercitif est constant lorsque l'extrémité du vecteur aimantation décrit le diamètre de facile aimantation ou une corde parallèle à ce diamètre. Sa grandeur est proportionnelle à la flèche de cette corde.* Ces propositions contiennent la détermination de l'énergie d'hystérèse alternative et de l'énergie d'hystérèse dite *tournante*.

L'étude thermique de la substance a montré que la pyrrhotine perd son ferromagnétisme à 348°. La courbe de décroissance de l'aimantation à saturation vers cette température a une allure nettement parabolique pour les pyrrhotines auxquelles se rapportent les résultats ci-dessus et que j'appellerai *pyrrothines normales*. Ce phénomène est réversible. Il en est de même de la grandeur de l'hystérèse en fonction de la température. *L'énergie d'hystérèse décroît proportionnellement au carré de l'intensité d'aimantation à saturation*, ce qui est conforme aux hypothèses moléculaires qui attribuent les phénomènes résiduels aux actions mutuelles des aimants élémentaires.

A côté de ces substances normales l'étude thermomagnétique a révélé

l'existence de substances *anormales* irréversibles thermiquement. Ces substances ont des propriétés qui ne sont qu'une image vague et profondément altérée des propriétés si nettes de la pyrrhotine normale; elles manifestent tant en fonction du champ qu'en fonction de la température des phénomènes de viscosité. Les échantillons de ce deuxième groupe n'avaient pas la belle apparence homogène de ceux du premier groupe, leur structure feuilletée laisse supposer un édifice cristallin profondément troublé.

Expériences de M. Cooper Hewitt sur les tubes à vide. — M. Maurice Leblanc rend compte des recherches faites par M. Cooper Hewitt sur les tubes à vide et signale quatre applications des tubes à vide à cathode de mercure : 1° lampes dites à vapeur de mercure; 2° soupape électrique; 3° exploseurs; 4° interrupteur pour courants alternatifs.

M. Cooper Hewitt a montré que, contrairement à une opinion répandue, un tube à vide conduisait d'autant mieux le courant électrique que le vide y avait été poussé plus loin, une fois ce tube amorcé. C'est seulement l'amorçage qui devient de plus en plus difficile, lorsqu'on veut le déterminer avec une simple différence de potentiels et que le vide devient très grand. Mais on y arrive toujours avec la plus grande facilité, en établissant un court-circuit momentané dans le tube. L'arc qui jaillit dans le tube, au moment de la rupture du court-circuit, détermine toujours son amorçage, quel que soit le degré de vide.

Enfin, M. Cooper Hewitt a découvert cette propriété nouvelle des cathodes qu'il a appelée *répugnance* et a donné les moyens de la surmonter.

Les tubes à vide paraissent, dès maintenant, appelés à rendre les plus grands services industriels. Non seulement on peut faire avec eux des appareils d'éclairage intéressants, mais il est probable que, dans l'avenir, en suivant la voie ouverte par M. Hewitt, on pourra les appliquer à la production et à l'utilisation industrielle des courants de haute fréquence avec lesquels on pourra, nous l'espérons, résoudre des problèmes nouveaux, relatifs à la transmission de l'énergie, qui ne sauraient l'être avec les moyens dont nous disposons aujourd'hui.

En terminant, M. Maurice Leblanc remercie M. le Dr de Recklinghausen, collaborateur de M. Cooper Hewitt, qui lui a fourni les renseignements nécessaires à sa conférence et a bien voulu répéter devant les membres de la Société les expériences fondamentales auxquelles il a participé.

Les phénomènes qui accompagnent les décharges électriques dans l'air, par J. de Kowalski. — 1. Il y a certaines lois générales qu'on peut déduire des équations fondamentales de l'Électrodynamique et qui régissent les phénomènes des décharges électriques.

Voici une de ces lois, établie théoriquement par Kauffmann :

Soit $E = f(I)$ l'équation qui nous donne la relation entre la force électromotrice aux bornes des électrodes où se produit la décharge et l'intensité du courant. Pour que la décharge soit stationnaire (non intermittente) les deux inéquations suivantes doivent être toujours remplies :

$$\frac{1}{CR} + \frac{1}{l}\frac{\partial E}{\partial I} > 0,$$

$$R + \frac{\partial E}{\partial I} > 0.$$

Dans ces inéquations C est la capacité des électrodes, R la résistance du

circuit amenant le courant aux électrodes, l la self-induction du circuit. Par une série d'expériences, en observant surtout l'arc à très haute tension jaillissant entre électrodes métalliques, j'ai pu vérifier ces inéquations.

2. Pour approfondir les phénomènes mêmes des décharges, il est utile de prendre comme base la théorie des ions dans les gaz. Les décharges continues entre deux électrodes ont deux formes distinctes : les décharges à lueur et les décharges à arc.

Ces deux formes de décharges ne diffèrent entre elles que par les phénomènes d'ionisation du côté de la cathode.

Tandis qu'à la décharge à lueur le nombre des ions produits à la cathode est relativement petit et n'est composé exclusivement que des ions du gaz ambiant, il n'en est pas de même pour la décharge à arc. Dans ce dernier cas le nombre des ions augmente notablement aux environs de la cathode et ce sont surtout les ions du métal de la cathode qu'on observe dans son voisinage.

Ces ions sont produits par l'élévation de la température de la surface de la cathode, et l'élévation même de son côté est produite par le choc des ions positifs gazeux attirés par la charge négative.

Si on les laisse parcourir librement une différence de potentiel déterminée, ces ions gazeux atteignent une température très élevée. Cette théorie a été émise pour la première fois par M. Stark, et une série d'expériences faites par M. de Kowalski et ses élèves dans le Laboratoire de Fribourg sont en parfait accord avec elle (expériences et projections). L'auteur fait remarquer que, dans les photographies du spectre aux environs de la cathode, dans l'arc aux électrodes de cadmium, ce spectre démontre d'une manière sûre et exacte l'existence des vapeurs de ce métal. D'autres photographies de spectres nous montrent les différentes zones de l'arc.

3. En appliquant la théorie des ions à la décharge oscillante, il est aussi facile d'expliquer les phénomènes qui l'accompagnent. Ainsi on a remarqué que les électrodes à cette décharge s'échauffent beaucoup moins qu'à la décharge à l'arc, quoique l'intensité du courant est beaucoup plus élevée. S'il en est ainsi, c'est parce que le bombardement des électrodes par les ions ne peut pas se produire, le sens du courant changeant très rapidement.

Les décharges oscillantes sont accompagnées d'une pulvérisation du métal des électrodes. Les particules métalliques viennent à la rencontre des ions gazeux et produisent par leur choc de nouveaux ions.

L'espace explosif devient alors très fortement conducteur (expériences).

SÉANCE DU 5 MAI 1905.

Présidence de M. E.-H. Amagat.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 7 avril est lu et adopté.

Les personnes dont les noms suivent sont présentées pour être Membres de la Société. Il sera statué sur leur admission dans la séance du 19 mai prochain.

MM. Andrade (J.-F.-C.), Professeur à la Faculté des Sciences de Besançon;
Bergé (E.), Professeur au Collège de Lunéville;
Berthon (L.-A.), Administrateur de la Société industrielle des Téléphones, à Paris;
Bosler (J.), ancien Élève de l'École Polytechnique, Paris;
Boucher (A.), Ingénieur à Prilly, canton de Vaud (Suisse);
Brylinski (E.), Sous-Directeur du *Triphasé*, à Asnières;
Cabral (P.-B.), Ingénieur civil, Professeur d'Electrotechnie, à Lisbonne;
Cadémartory (L.), Ingénieur de la Marine, à Toulon:
Caralp (P.), Professeur de Physique au Lycée de Foix;
Claude (E.), Ingénieur, à Léon (Espagne);
Cosserat (F.), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Paris;
Curchod (A.), Licencié ès Sciences, à Lausanne (Suisse);
Delemer (J.-J.-B.), Professeur de Physique aux Facultés catholiques de Lille;
Desplans (M.), Professeur de Physique au Collège de Carpentras (Vaucluse;
Dickstein (S.), à Varsovie (Russie);
Domage (H.-L.-A.), Directeur de la Société nouvelle des Charbonnages des Bouches-du-Rhône, à Marseille;
Duchaussoy (J.-H.), Professeur au Lycée d'Amiens;
Dugas (E.-G.-J.), Professeur au Lycée de Quimper;
Ducesco (C.), Ingénieur, Sous-Chef de Division aux Chemins de fer roumains, à Buzeu (Roumanie);
Mlle Dupesan (M.), Directrice du Collège de jeunes filles de Morlaix;
MM. Emery (J.-E.), Capitaine d'Artillerie, Membre de la Commission d'expériences de Bourges;
Eötvös (Baron Roland), Professeur à l'Université de Budapest (Hongrie);
Farcot fils (E.-F. M.), Ingénieur-Constructeur, Paris;
Faucon (A.-M.), Chef de travaux pratiques de Physique à l'École supérieure de Pharmacie de Montpellier (Hérault);
Fontaneau (E.-J.-E.), ancien Officier de Marine, à Limoges (Haute-Vienne);
Fortin (J.), Ingénieur, à Carcassonne (Aude);
Franchimont (A.-P.-N.), Professeur à l'Université de Leyde (Pays-Bas);
Frutiger (G.), Docteur ès Sciences, Professeur, à Genève (Suisse);
Gagnière (J.), Industriel, à Clermont-Ferrand;
Gaultier (G.), Ingénieur, Paris;
Gesché (L.), Chargé de cours à l'Université de l'État, à Gand (Belgique);
Grenet (L.), Ingénieur civil des Mines, à Montluçon;
Haas (Dr Marc de), Professeur à l'Ecole Polytechnique, à Delft (Hollande;
Henry (A.), Ingénieur de la Raffinerie A. Sommier et Cie, Paris;
Hocfiz (Mohammed), Ingénieur, à Mansourah (Egypte);
Hollard (A.), Chef du Laboratoire central des Usines de la Compagnie française des Métaux, à Saint-Denis;
Joly (A.), Professeur au Lycée de Toulouse;
Joye (P.), Assistant au Laboratoire de Physique de l'Université de Fribourg (Suisse);
Mlle Kahn (H.-A.), Professeur au Collège de jeunes filles, à Orléans;
MM. Kerntler (F.), Directeur de la Société de Tunnel de Budapest (Hongrie);
Klotz (H.), à Paris;
Krause (Dr G.), Redakteur der *Chemiker-Zeitung*, Cöthen (Allemagne);
Labbé (A.), Interne à l'Asile de Ville-Evrard, à Neuilly-sur-Marne (Seine-et-Oise);
Le Laboratoire d'Essais du Conservatoire des Arts et Métiers, Paris.
Lehmann (Th.), Ingénieur de la Société alsacienne de Constructions mécaniques, à Belfort;
Liénard (A.-M.), Professeur à l'École des Mines de Saint-Étienne;
Linardos (G.), Ingénieur industriel, à Constantinople;
Mailly (P.-M.), Directeur de la Société anonyme d'Explosifs et de Produits chimiques, à Villafranca in Lunigiana (Italie);
Mallard (H.), Lieutenant au 2e régiment d'Artillerie, à Grenoble;
Massol (R.-G.), Directeur de l'École supérieure de Pharmacie de Montpellier;

MM. Mathieu (P.-H.), Ingénieur-Électricien, Professeur de Physique, à Gentilly;
Mathieu (J.-F.), Ingénieur-Chimiste (Explorateur), 6, rue Choron, Paris;
Maurin (J.-L.-M.), Lieutenant d'Artillerie coloniale à Lorient;
Mercier (P.), Chimiste, à Paris;
Meyer (J.), Chef des travaux de la Physique à la Faculté des Sciences, à Nancy;
Montlaur (Comte A. de), Président de la Société d'Électrochimie, à Paris.
Mouneyrat (Dr A.), Paris;
Natanson (Ladislas), Professeur à l'Université de Cracovie (Autriche);
Neu (L.), Ingénieur-Conseil, à Lille;
Nogues (H.), Professeur-Délégué de Physique, 26 *bis*, rue Saint-Léonard, à Angers;
Paillée (R.), Pharmacien de 1re classe, à Arthon-en-Retz (Loire-Inférieure:
Petrovitch (Serge), Colonel de l'Artillerie, Professeur adjoint à l'Académie d'Artillerie Michel, à Saint-Pétersbourg (Russie);
Pillot (A.), Professeur au Lycée de Charleville;
Pont, Professeur au Lycée Hoche, à Versailles;
Prévost (Baron Henri), à Paris;
Raps (A.), Professeur, Docteur ès Sciences, Berlin-Westend, Ulmin Allec, 14.
Rogow Moissej, Chimiste à Munich, Allemagne.
Mlle Romagny (L.-L.), Professeur à l'Ecole normale d'Institutrices de Vannes (Morbihan);
MM. Saltykow (N.), Professeur à l'Institut polytechnique de Kiev (Russie);
Schoop (M.-U.), Ingénieur électrochimiste, à Bois-Colombes;
Shorter (Lewis R.), B. Sc. de l'Université de Londres (Angleterre);
Seignier (P.), Professeur au Collège, à Mauriac (Cantal);
Sissingh (Dr R.), Professeur à l'Université d'Amsterdam (Hollande);
Soisson (G.) Professeur à l'École industrielle et commerciale, à Luxembourg (Grand Duché de Luxembourg);
Solvay (E.), Industriel à Bruxelles (Belgique);
Strouhal (Dr V.), Professeur à l'Université de Bohême, à Prague (Clémentinum);
Mme Tissot, à Brest (Finistère);
MM. Vié (F.), Ingénieur, à Nantes;
Voigt (W.), Professeur an der Universität Gœttingen (Allemagne);
Volterra (Vito), Professeur à l'Université, à Rome (Italie);
Vorges (H. de), Ingénieur des Arts et Manufactures, à Soissons;
Watteville (Baron Ch. de), Docteur ès Sciences physiques, à Paris;
Zempléen (G.), Docteur ès Sciences, Professeur à l'Université de Budapest (Autriche-Hongrie).

M. le Président annonce en ces termes les pertes douloureuses que la Société a faites depuis sa dernière séance :

Messieurs,

Notre Société a été cruellement éprouvée depuis sa dernière séance, elle a perdu quatre de ses membres et non des moins éminents.

Vous vous rappelez que j'ai dû présider cette dernière réunion, averti au dernier moment qu'une indisposition retenait notre président alité; nous étions loin de nous douter que nous ne devions plus le revoir.

La mort de *H. Dufet* est une perte considérable pour la partie de la Science à laquelle il s'était consacré, l'Optique cristallographique; nous n'avons pu ici juger son œuvre à sa juste valeur, car c'est à la Société de Minéralogie qu'il en a exposé la plus grande partie : plus de quarante Notes sans compter celles publiées ici même, aux *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* et dans diverses autres publications.

Les travaux de H. Dufet sont considérés par les minéralogistes comme faits avec le soin le plus scrupuleux, d'une remarquable précision, et d'une haute valeur scientifique.

La Société de Physique ne saurait surtout oublier les trois Volumes des constantes physiques de l'Optique que nous lui devons; c'est un travail énorme qu'il a accompli seul et qui donne la mesure de son désintéressement et de son dévouement à la science et à notre Société.

J'ai prononcé quelques paroles sur sa tombe au nom de la Société française de Physique et je pense avoir été l'interprète des sentiments de tous ses membres en disant toute la sympathie dont il était entouré ici, et qu'il laisse parmi nous d'unanimes regrets.

Quelques jours après nous apprenions la mort subite du *colonel Renard.*

Le colonel Renard appartenait à notre Société depuis longtemps, il avait été élu membre de son Conseil en 1890 et paraissait tout indiqué pour en être un jour président.

Travailleur infatigable, il avait consacré tous ses efforts aux problèmes ardus de l'Aéronautique, il était devenu le maître incontesté de cette science pour laquelle sa mort est une perte irréparable.

Le colonel Renard n'a pas été seulement un inventeur érudit et merveilleusement doué, son intelligence était ouverte à toutes les cultures; il eût pu tout aussi bien être géomètre ou artiste à son gré.

Vous connaissez tous l'importance, la portée, la valeur scientifique de ses travaux, il les a lui-même exposés ici à plusieurs reprises et avec quelle clarté, quelle maîtrise et aussi avec quel charme; Ch. Renard était en effet un charmeur, son affabilité séduisait dès le premier abord et tous ses amis, dont je m'honore d'avoir été, savent que chez lui le fond l'emportait encore sur la forme, et qu'on ne peut avoir connu sans l'avoir aimé cet homme si charmant et si bon.

Son nom est un de ceux dont la Société de Physique a le droit d'être fière et son souvenir, j'en suis certain, demeurera longtemps parmi nous.

M. le Président annonce ensuite le décès de M. *le Professeur Tacchini,* Directeur du Bureau météorologique d'Italie, à Rome, et de M. *le baron Arnould Thénard,* Ingénieur agronome.

M. le Secrétaire général s'excuse auprès de MM. Bullier, Langevin, Baudin, de Sainville, Chomeau, Hinstin, le Directeur de l'Ecole primaire supérieure de La Flèche; le Directeur de l'Ecole normale d'Instituteurs de Toulouse; Thiéry, professeur au Collège de Péronne; Tiersot, constructeur à Paris; Vieillot, professeur à l'École normale des Instituteurs de Montpellier; Vincent, professeur au Lycée Saint-Louis; Aubert, professeur au Lycée de Bastia; Guillard, constructeur, Paris, de l'omission de leurs noms sur le **Programme de l'Exposition de la rue de Rennes et du Musée pédagogique**.

M. Villard regrette que M. Guébhard ne soit pas présent à la séance. Il aurait été désireux de lui adresser quelques questions précises au sujet de ses récentes publications et à propos, notamment, des notices exposées à Pâques. M. Villard se propose de reprendre la question au retour de M. Guébhard.

Sur la résistance au contact de deux métaux, par M. Blanc. — Le contact étudié était le contact entre deux surfaces d'acier bien polies, et la résistance était mesurée par le dispositif ordinaire du pont de Wheatstone; on pouvait faire varier l'intensité du courant qui traversait le contact. L'établissement du courant provoque une diminution progressive dans le temps et irréversible de la résistance du contact, qui constitue le phéno-

mène de la cohération; la résistance tend vers une limite donnée pour une intensité donnée, et la valeur de cette limite diminue quand l'intensité augmente. En outre, la résistance du contact varie réversiblement en fonction de l'intensité, quand la durée du passage du courant est trop faible pour que la cohération puisse se produire, ou encore quand la cohération est terminée pour les intensités considérées. Si l'on renverse le sens du courant pendant que la cohération s'effectue progressivement dans le temps, les premières inversions produisent une chute de résistance très marquée qui s'atténue peu à peu; on a même ensuite une augmentation très faible et tout effet disparaît finalement quand la cohération est terminée.

D'autre part, si l'on étudie la résistance du contact en fonction de la pression, on constate que les résultats expérimentaux ne s'accordent pas avec les conséquences qu'on peut déduire des formules données par Hertz pour calculer la déformation des surfaces et, par suite, la résistance du contact. On est amené à supposer qu'en outre de la déformation élastique il se produit en chaque point de contact une modification qui diminue la résistance en ce point. Cette modification change surtout les résultats pour les faibles pressions et la courbe de la résistance descend d'abord, à mesure que la pression augmente, beaucoup plus vite que ne l'indiqueraient les formules de Hertz. De plus, la modification dont on est obligé d'admettre l'existence n'est pas instantanée, mais progressive dans le temps; elle est, au moins en partie, irréversible, car on trouve une résistance plus faible pour la même valeur de la pression quand on fait décroître la pression après être allé jusqu'à une valeur maxima. Ces analogies avec la cohération se précisent encore par le fait suivant : si l'on produit la cohération du contact pendant qu'on augmente la pression, la résistance qui a diminué brusquement reste constante pendant un certain temps, pendant que la pression continue à augmenter, et ne se remet à diminuer que lorsque la pression a subi une augmentation notable. Si l'on cohère au contraire pendant qu'on diminue la pression, la résistance se remet à augmenter comme elle le fait quand elle n'est pas cohérée, et l'on n'a aucune discontinuité dans la courbe. Les modifications dues à la cohération et à la pression paraissent donc analogues.

On a examiné au microscope la surface supérieure d'un contact formée d'un couvre-objet de microscope recouvert d'une couche d'argent transparente; la deuxième partie du contact était une sphère d'acier parfaitement polie; les anneaux produits entre les deux surfaces permettent de mesurer leur distance. On constate qu'avec une différence de potentiel faible, le courant ne passe qu'au contact optique, et il n'y a pas d'étincelle; on ne peut produire la cohération qu'à ce moment, et elle se produit sans qu'on voie ni étincelle, ni fusion. La surface ne présente aucune modification apparente.

Une autre expérience montre que le phénomène est purement superficiel : on peut faire deux gouttes de mercure très propre qui se touchent sans se mélanger si le mercure contient des traces d'oxyde; les deux gouttes forment un cohéreur et ne se mélangent pas par la cohération, malgré leur fragilité.

Tous ces faits suggèrent un rapprochement entre le phénomène de la cohération et celui de soudure par diffusion des métaux, réalisée sous l'action de la pression dans les expériences de W. Spring. Le courant provoquerait cette diffusion, comme le fait la pression. On peut se rendre compte de cette action du courant et de la cohération, par la théorie cinétique des métaux.

Nouvelle détermination de la masse du décimètre cube d'eau pure (Méthode de MM. Macé de Lépinay, Benoît et Buisson); par M. H. Buisson. — Le problème de la détermination de la masse du décimètre

cube d'eau pure est le même que celui de la détermination du rapport du décimètre cube au litre, volume occupé à 4° par 1^{kg} d'eau.

La méthode consiste à mesurer un même volume avec les deux unités. Dans le cas actuel, on prend un solide bien défini, un cube, fait d'une matière inaltérable, le quartz, dont le volume se déduira de mesures de longueur.

On l'évalue en litres, par la méthode des pesées hydrostatiques. Pour éviter les erreurs provenant des accidents possibles on détermine d'abord sa masse M. puis à loisir sa densité relative à l'eau, soit d_0. $\frac{M}{d_0}$ est son volume à 0°, en litres. Ces mesures, qui ont porté sur deux cubes de 4^{cm} et 5^{cm} d'arête, ont été faites par M. Benoît, au Bureau international des Poids et Mesures.

Les dimensions géométriques ont été mesurées optiquement, suivant la méthode déjà publiée de MM. Macé de Lépinay et Buisson. Par l'emploi de deux phénomènes d'interférences, les franges des lames parallèles épaisses et celles des lames mixtes, on obtient l'épaisseur de la lame sans faire intervenir son indice ni aucune autre surface étrangère. On mesure les parties fractionnaires des ordres d'interférence, et, par l'emploi de la méthode des excédents fractionnaires, on en détermine les parties entières, Il faut pour cela employer plusieurs radiations; on s'adresse à celles du cadmium, dont les rapports des longueurs d'onde sont connus par les mesures de MM. Michelson et Benoît. On a d'abord une valeur approchée de l'épaisseur par une mesure au sphéromètre, qui suffit jusqu'à 4^{cm}, mais qui doit être précisée par des déterminations optiques, pour une lame de 5^{cm}.

Tous les appareils sont disposés dans une cave, bien à l'abri des variations de température. Une mesure dure quelques minutes seulement, de sorte que la température du quartz est parfaitement définie.

L'erreur commise sur chaque mesure d'épaisseur ne dépasse pas $0^{\mu},01$. La taille des cubes est presque parfaite. Les variations d'épaisseur pour un couple de faces ne dépassent pas $0^{\mu},2$ pour le cube de 5^{cm} d'arête, de sorte que l'épaisseur moyenne s'obtient sans aucune incertitude. De plus, les angles dièdres ne diffèrent pas d'un angle droit de plus de quelques secondes.

Les résultats sont les suivants :

Le volume du cube de 4^{cm} est de

$$59^{ml},88842 \quad \text{et} \quad 59^{cm^3},88998;$$

celui du cube de 5^{cm} est

$$122^{ml},66033 \quad \text{et} \quad 122^{cm^3},66390.$$

On en déduit :

$$1^{l} = 1^{dm^3},000026 \qquad \text{et} \qquad 1^{l} = 1^{dm^3},000029,$$

soit, pour la masse du décimètre cube d'eau,

$$999^{g},974 \quad \text{et} \quad 999^{g},971.$$

Ce dernier nombre est, d'ailleurs, provisoire; tous les calculs devant subir une revision définitive.

L'écart entre ces deux valeurs est donc de 3^{mg} et semble donner une limite de l'erreur qui a pu être commise.

Ces nombres se rapportent à l'eau saturée d'air.

Un autre résultat ressort des mesures faites sur ces deux cubes : c'est l'écart que présentent les propriétés du quartz qui les constitue.

Les dilatations, les indices, les densités sont différents. Ainsi la densité du cube de 4^{cm} est 2,650739; celle du cube de 5^{cm}, 2,650663.

De plus, d'un point à l'autre d'un même cube, l'indice de réfraction varie. Il ne semble pas possible d'avoir du quartz parfaitement homogène.

M. Guillaume insiste sur la grande importance du problème traité par MM. Macé de Lépinay, Benoît et Buisson, et auquel il a consacré lui-même plusieurs années de mesures qui viennent d'être achevées.

Les expériences de ces dernières années ont montré que la relation entre le kilogramme et le mètre a été réalisée avec une précision admirable et vraiment inespérée, circonstance extrêmement heureuse pour l'harmonie des relations métriques et l'expansion future du système. Mais, jusqu'à ces tout derniers temps, on avait conservé des doutes sur l'exactitude des expériences de Lefebvre-Gineau et Fabbroni, en raison des grandes divergences trouvées, par divers observateurs, entre la valeur légale du kilogramme et sa définition théorique. Ainsi Shuckburgh et Kater, Berzélius, Svanberg et Akerman, Stampfer avaient donné des nombres conduisant à admettre, pour le kilogramme, une erreur comprise entre 250^{mg} et 450^{mg}. Les nombres de Kupffer étaient, il est vrai, plus petits. La diversité de signe des écarts trouvés empêcha heureusement la Commission du Mètre de 1872 de songer à aucune modification de la valeur du kilogramme.

M. Macé de Lépinay est le premier qui ait pensé à relier les longueurs d'ondes lumineuses à la masse du décimètre cube d'eau; mais son premier projet consistait à prendre le problème en sens inverse. Partant de l'idée que le kilogramme correspondait sensiblement à sa définition, il se proposait de déterminer les longueurs d'onde en passant par le volume d'un cube de quartz. Entre temps, l'élaboration des méthodes de M. Michelson et leur mise en œuvre, au Bureau international, par MM. Michelson et Benoît, vinrent donner au problème un sens exactement contraire, et c'est pourquoi le premier projet de M. Macé de Lépinay s'est transformé en celui de la détermination de la masse du décimètre cube d'eau.

Etant donnée l'erreur réelle de la construction du kilogramme, nous voyons aujourd'hui que, dans l'hypothèse de son exactitude, on aurait pu déterminer l'échelle des longueurs d'onde au $\frac{1}{100000}$ près, alors que l'erreur moyenne des nombres de Rowland est de $\frac{1}{50000}$ environ. De même, les nombres obtenus par M. P. Chappuis, par une autre méthode interférentielle pour le décimètre cube d'eau, sont très voisins de ceux que M. Buisson a indiqués. Ceux que M. Guillaume a déterminés à l'aide d'une méthode de contact s'en écartent légèrement dans le sens prévu par la discussion des erreurs probables de la méthode. Mais un nouveau travail, fait par la même méthode, en se servant d'instruments plus parfaits, semble devoir conduire à des résultats extrêmement voisins de ceux que fournissent les méthodes interférentielles.

Sur l'équilibre thermique. — M. Le Bel rend compte de la suite de ses expériences sur l'équilibre thermique (1). Les anciens appareils à lames minces d'or recouvertes de sulfure de fer et bitume de Judée ont continué depuis plus d'un an à donner le même excédent de température (0°,03). L'un d'eux, entouré d'hydrogène et renfermé dans du verre à couvercle mastiqué, a été plongé dans la vaseline; l'excédent observé est encore de 0°,02.

Ces observations sont faites maintenant dans une cave profonde de 20^{m} à température très constante. La nature des voûtes en calcaire paraît exer-

(1) Voir *Bulletin des séances*, 20 mars 1903.

cer une influence favorable; au contraire, les matières vitrifiées, verre, etc., semblent diminuer les chiffres observés. Un bloc de granit entouré d'asbeste a fourni de 0°,03 à 0°,04.

Le soufre, la barytine et le plâtre de carrière ont fourni des résultats analogues, mais ces trois matières subissent une certaine altération spontanée qui nécessite une observation de plus d'une année; leur effet, d'abord décroissant, tend vers une constante.

L'auteur a étudié ensuite les phénomènes qui se produisent avec des fils métalliques minces. On sait qu'un fil de platine très mince fond dans la flamme d'un bec de Bunsen; on s'expliquait ce fait en admettant que le platine déterminait une combustion plus vive, mais le même fait se reproduit avec une lampe Nernst qui fond très bien les fils minces et ne réussit pas à fondre un petit cavalier de fil plus épais à cheval sur le filament chaud. En dernier lieu on peut fondre le fil mince facilement en faisant passer le courant dans un fil plus épais enroulé en spirale. L'auteur se réserve d'étudier l'action des fils minces par des mesures thermiques directes, il pense que cette étude est nécessaire avant de tirer des conclusions sur les observations ci-dessus.

SÉANCE DU 19 MAI 1905.

PRÉSIDENCE DE M. E.-H. AMAGAT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 5 mai est lu et adopté.

Les personnes qui ont été présentées dans la dernière séance sont élues membres de la Société.

Les personnes dont les noms suivent sont présentées pour être Membres de la Société. Il sera statué sur leur admission dans la séance du 2 juin:

MM. APOIL, Censeur de l'École de la Manufacture de Sèvres;
BARUS (Carl), Professeur de Physique, Brown University, Providence R. I. (U. S. A.);
CHAUVEAU, Membre de l'Institut, à Paris;
DESCOMBES (L.), Chargé de cours au Lycée de Guéret;
DUNCAN (Louis), P. D. Johns Stopkins University, New-York (U. S. A);
FERREIRA DA SILVA, Professeur à l'Académie Polytechnique, Porto (Portugal);
FOREST PALMER (Albert de), Professeur de Physique, Brown University, Providence R. I. (U. S. A);
GIRAN (H.), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Montpellier;
GOURGUECHON, (G.), Ingénieur au corps des Mines, Chef du Service des Mines de la Régence de Tunis (Tunisie);
GROSSELIN, Vice-Président de la Société Internationale des Électriciens, à Paris;
HUBERT (H.), Inspecteur général des Mines, Professeur à l'Université, à Liège (Belgique);
LACOMBE (E.), Pharmacien, à Sarlat;
LARMOR (Joseph), Lucasia Professor of Mathematics, Saint-John's Collège, Cambridge (Angleterre);
NICOLLE (Abel), Ingénieur de la Marine, à Toulon;
PAINLEVÉ (Paul), Membre de l'Institut, à Paris;

MM. Pellet (Auguste-C.-L.), Professeur à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand;
Pereira (Alfredo), Pharmaceutico en chef Hospital de Conde de Ferreira, à Porto (Portugal);
Sedziak, Ingénieur Electricien, Directeur de Dours Draft Boiter and Machine C°, à Saint-Louis, Miss. (U. S. A.);
Vuillet (Eugène), Professeur à l'Ecole Normale de Grenoble;
Wind (Dr C.-H.), Professeur de Physique mathématique et de Mécanique théorique à l'Université d'Utrecht (Hollande);
Witkowski (Auguste), Professeur de Physique à l'Université de Cracovie (Autriche);
Zenger (Ch.-V.), Conseiller à la Cour, Membre de l'Académie François Joseph Ier, Professeur à l'Ecole Polytechnique, à Prague (Autriche);
Zalacostas (Pierre), Directeur du Laboratoire de Chimie au Ministère des finances, à Athènes (Grèce);
Zaremba (Stanislas), Professeur à l'Université et Correspondant de l'Académie des Sciences de Cracovie (Autriche).

M. le Président annonce en ces termes le décès de M. Alfred Potier.

Messieurs,

Un nouveau deuil vient de s'ajouter à ceux que j'ai eu le pénible devoir de vous annoncer dans notre dernière réunion; notre éminent et vénéré maître *Alfred Potier* est mort mardi dernier à la suite d'une longue et cruelle maladie qui, pendant plus de dix ans, l'a tenu éloigné de nous, immobilisé dans son cabinet de travail.

Le mal s'étant aggravé, il a dû prendre le lit il y a quelques mois et ne l'a plus quitté.

Malgré un affaiblissement extrême, même sur son lit de douleur, il a gardé intacte, jusqu'au dernier moment, cette lucidité et cette puissance de travail auxquelles il devait une érudition réellement encyclopédique; cette érudition, pour ainsi dire, proverbiale, il la prodiguait à tous avec une bienveillance exquise et un désintéressement absolu; son dévouement à la Science n'a eu d'égale que la franchise de son caractère, sa bonté et l'impartialité la plus scrupuleuse.

Quoique Alfred Potier ait été surtout un érudit profond et incomparable, la Science lui doit un certain nombre de travaux de valeur; vous connaissez tous le théorème classique de thermodynamique qui porte son nom, il laisse encore plusieurs recherches intéressantes relatives à l'optique et à divers autres points de la Physique; mais son étude de prédilection a été celle des phénomènes électriques et électromagnétiques, et, par ses recherches, par ses conseils, et par le cours qu'il professait à l'École des Mines, il a puissamment contribué au progrès de cette partie de la Science et surtout de ses applications.

Son autorité n'était pas moins grande en Minéralogie, en Géologie et dans un grand nombre de questions relatives à l'Art de l'Ingénieur. Il avait été, en effet, un éminent ingénieur au corps des Mines dont il était depuis quelques années inspecteur général.

Alfred Potier avait été notre Président en 1884, le titre de Membre honoraire lui avait été conféré en 1902; son nom gardera donc désormais une place d'honneur dans les Annales de notre Société.

M. le Président adresse ensuite des remercîments et des félicitations au nom de tous les Membres de la Société de Physique :

A MM. les Directeurs des Compagnies de Chemins de Fer qui ont bien voulu faciliter le voyage à Paris d'un grand nombre de nos confrères de province.

Aux Compagnies auxquelles nous devons le brillant éclairage électrique des diverses parties de notre Exposition.

A MM. les Conférenciers; à M. Lorentz dont il rappelle l'admirable Conférence, à MM. Janet, Pierre Weiss, Leblanc, de Kowalski, dont les Conférences si intéressantes ont obtenu le plus vif succès.

A M. Lyon, pour l'amabilité avec laquelle il a conduit lui-même la visite si intéressante de la manufacture de pianos qu'il dirige avec tant de compétence; et à M. Dussaud pour sa gracieuse invitation à une séance de cinématographie également très intéressante et très variée.

A MM. les Professeurs et les Constructeurs qui ont concouru cette année à l'éclat de notre Exposition qui ne le cède en rien à celle des années prédentes.

Enfin M. le Président rappelle le succès dépassant notre attente, de l'Exposition faite au Musée Pédagogique, il dit qu'il faut remercier et féliciter sans réserve MM. les Professeurs qui ont répondu à notre appel, pour l'ingéniosité qu'ils ont montrée et leur dévouement à la mission qui leur est confiée; il remercie également M. le secrétaire général pour la part qui lui revient dans le succès de cette innovation et M. Sandoz pour tout ce que la bonne organisation de nos séances et de nos Expositions doit à son zèle éclairé et son dévouement.

M. le Président dit ensuite quelques mots relatifs à la prospérité et à la vitalité toujours croissantes de la Société et annonce une nouvelle et nombreuse liste de demandes d'adhésion, laquelle porte à 157 le nombre des nouveaux membres qui ont répondu à la récente circulaire de M. le Secrétaire général.

Le Secrétaire général signale, parmi les appareils exposés au Musée Pédagogique, la remarquable série de trente instruments de manipulations de M. Searle, Professeur à l'Université de Cambridge, qui ont été conservés par le Musée. Ces instruments, étudiés avec un soin extrême par M. Searle en vue des manipulations de ses propres élèves, ont été reproduits pour nous et avec un réel désintéressement, par M. G. Pye, constructeur à Cambridge.

M. le Président donne lecture d'une lettre de M. Cailletet, Président de l'Aéro-Club de France, demandant à la Société de Physique de choisir deux de ses membres pour faire partie du Comité exécutif du monument à élever à la Mémoire du Colonel *Charles Renard*.

Sont désignés : M. E.-H. Amagat, Président, et M. Henri Abraham, Secrétaire général.

Sur les ions de l'atmosphère, par M. P. Langevin. — I. M. Langevin rappelle qu'il a démontré la présence constante dans l'atmosphère d'ions de faible mobilité, analogues à ceux que produisent les actions chimiques (oxydation du phosphore, combustions, etc.). Le nombre de ces gros ions est en général, au voisinage du sol, considérable par rapport à celui des ions ordinaires, de mobilité environ mille fois plus grande, que produisent les radiations provenant du Soleil ou des matières radioactives présentes dans le sol ou dans l'air.

II. L'existence de ces gros ions permet d'interpréter de manière simple la diminution progressive du courant qu'on peut faire passer dans une masse limitée d'air aussitôt après son introduction dans un récipient métallique fermé portant une électrode centrale isolée reliée à un électromètre. Cette diminution, qui dure environ une heure pour un récipient de 80^{cm} de diamètre quand une différence de potentiel de 700 volts est maintenue

entre l'électrode et la paroi, a été observée en particulier par M. Mac Lennan et rapportée par lui à l'existence dans l'air d'une radioactivité induite qui disparaît spontanément après l'introduction de l'air en vase clos. Cette explication semble insuffisante, car elle implique une loi de variation du courant indépendante du champ électrique employé pour la mesure, tandis que l'expérience donne une influence considérable de ce champ. La diminution du courant se produit de manière toute différente, suivant qu'on maintient le champ de façon continue ou qu'on l'établit seulement au moment des mesures; elle est d'autant plus rapide que ce champ est plus intense, et peut même être remplacée par un accroissement si l'on supprime le champ après l'avoir maintenu pendant un temps suffisant. De plus, le passage de l'air sur un tampon d'ouate avant son introduction dans le récipient *supprime la diminution de manière complète* sans que l'ouate manifeste une radioactivité comparable à celle nécessaire pour l'explication proposée.

La présence, dans l'air introduit, de gros ions que le champ ne peut recueillir qu'en un temps très long, d'autant plus que le champ est plus faible, représente au contraire très bien tous les faits précédents, l'ordre de grandeur des mobilités nécessaires étant toujours de $\frac{1}{100}$ de millimètre par seconde dans un champ de 1 volt par centimètre.

De plus, l'introduction artificielle dans le récipient de gros ions produits par une flamme ou par la combustion du tabac, donne lieu à des phénomènes plus intenses, mais exactement semblables aux précédents, s'accordant qualitativement et quantitativement avec les propriétés des ions peu mobiles.

III. L'origine de ces gros ions semble être la suivante : on sait que l'air renferme toujours des particules qui servent de germes pour la formation des gouttes dans une atmosphère légèrement sursaturée de vapeur d'eau. En se basant sur ces phénomènes de condensation, M. Aitken a pu mesurer le nombre de ces particules, peut-être résidus de gouttes évaporées, et l'a trouvé au voisinage du sol, de l'ordre de 100000 par centimètre cube. Les ions ordinaires, produits continuellement par les radiations diverses, sont attirés électrostatiquement par ces particules dont le pouvoir inducteur spécifique est différent de celui du milieu et les chargent. Cette tranformation des particules neutres en gros ions est limitée par la recombinaison des gros ions ainsi formés avec les petits ions de signe contraire, et, si les petits ions des deux signes sont également nombreux, il s'établit un régime permanent dans lequel une fraction seulement des particules est transformée en gros ions des deux signes, fraction qui dépend de la grosseur des particules, mais est *indépendante au nombre des petits ions,* puisque les deux phénomènes inverses de diffusion et de recombinaison se font avec des vitesses proportionnelles à ce nombre.

L'expérience confirme entièrement ce résultat et toutes les conséquences de la théorie précédente : l'introduction d'une substance fortement radioactive dans un récipient contenant de l'air chargé de particules en suspension ne modifie nullement le nombre des gros ions. De plus l'accroissement du courant constaté précédemment après une suppression momentanée du champ s'explique par la présence des particules neutres qui ne se chargeaient pas lorsque le champ extrayait rapidement du gaz les petits ions à mesure de leur production, et qui se transforment à leur tour en gros ions après la suppression. L'accumulation des gros ions au voisinage des électrodes doit également intervenir et peut se démontrer expérimentalement par l'influence électrique qu'ils exercent sur les électrodes.

IV. La théorie précédente prévoit également que toutes les particules deviendront des gros ions si l'air ne renferme que des petits ions d'un seul

signe, et l'expérience confirme cette prévision dans des circonstances variées. En particulier l'action de la lumière ultra-violette sur une lame de zinc chargée négativement produit des gros ions négatifs dans l'air *non filtré*. et leur nombre est de l'ordre de 100000 par centimètre cube, conformément au résultat déduit par M. Aitken des expériences de condensation, tandis que le nombre des gros ions de chaque signe était d'environ 10000 auparavant.

L'expérience précédente fournit un moyen simple de confirmer avec précision *l'absence complète dans l'air d'ions de mobilités intermédiaires entre celles des petits et des gros ions*. Ces derniers, dont la grosseur minimum déduite de leur mobilité ($10^{\mu\mu}$ de diamètre environ) correspond à l'épaisseur de la tache noire dans les lames liquides minces, constituent une catégorie bien distincte des ions ordinaires et doivent être étudiés indépendamment au point de vue des variations de leur nombre dans l'air.

Cette absence complète d'intermédiaires stables résulte également d'expériences du type décrit dans une communication précédente et reprises avec le plus grand soin sur l'air atmosphérique normal, prélevé près du sol. Elle est également confirmée par des expériences récentes de M. Bloch sur les gaz de la flamme.

V. L'action directe sur l'air de la lumière ultra-violette produite par un arc à charbons donne des petits ions négatifs et des gros ions positifs, ainsi que M. Lenard l'avait observé. Cet effet, attribué par lui à une action directe de la lumière sur le gaz, *disparaît de manière complète*, au moins en ce qui concerne les gros ions positifs, quand l'air est filtré sur un tampon d'ouate. Il semble donc provenir, contrairement à l'opinion de M. Lenard, d'une action photo-électrique de la lumière sur les particules ou poussières contenues dans l'air, qui provoque l'émission par celles-ci de corpuscules négatifs et les transforme en gros ions positifs. *L'action de la lumière ultra-violette de l'arc sur l'air privé de poussières ne produit pas d'ions de faible mobilité*. Il serait intéressant de savoir comment l'effet photo-électrique sur les particules en suspension dans l'air dépend de leur nature.

Expériences sur la résistance des fils métalliques pour les courants de haute fréquence. — MM. Broca et Turchini ont étudié la résistance de divers fils métalliques pour les courants de haute fréquence, et ils ont trouvé certains écarts entre l'expérience et la théorie de Thomson qui semblent dus à une cause systématique.

Ils ont employé un électrodynamomètre composé d'une lame d'aluminium de 30 microns d'épaisseur, fixée à ses deux extrémités, verticalement d'un côté, horizontalement de l'autre.

Cette lame, de 80^{cm} de long, fléchit très aisément en son centre. Deux lames fixes agissent sur ce point quand un même courant les parcourt ainsi que la lame mobile. Les déviations de la lame mobile sont lues au moyen d'un microscope. On mesure ainsi l'intensité efficace du courant qui chauffe le fil étudié. On mesure cet échauffement au moyen d'un calorimètre convenable. Dans ces conditions, en employant comme interrupteur une turbine à mercure, qui seule donne une régularité suffisante d'interruption, on obtient des résultats susceptibles d'être mesurés. La précision avec laquelle les courants sont réglés est d'environ $\frac{1}{20}$.

Les auteurs ont mesuré les capacités qu'ils ont employées pour les fréquences même d'emploi. Ils ont pour cela mesuré exactement les capacités pour des courants alternatifs de 42 par seconde, et ils ont étudié la variation du pouvoir inducteur spécifique de leur verre en fonction de la fréquence. Ils ont ensuite employé d'autres bouteilles de Leyde qu'ils ont mesurées

par comparaison avec les premières pour les fréquences employées par une méthode de résonance.

Le calcul de la self a été fait en supposant le circuit composé d'un même fil, et de la longueur réelle totale qu'il possède, puis en attribuant au fil de ce diamètre, dans la self totale, une fraction de la self ainsi calculée, égale à la fraction de la longueur totale qu'il occupe. La somme des nombres ainsi obtenus donne la self du circuit total.

Les résultats obtenus sont les suivants : 1° Cuivre. Les points se rangent sur une même courbe dont les écarts avec la loi de Thomson pour les fréquences moindres que 1000000 peuvent peut-être s'expliquer au moyen de la présence d'une faible fraction de fer dans le cuivre employé. Au delà, les nombres mesurés présentent avec la loi de Thomson des écarts considérables, dont la cause est à étudier.

2° Fer. Le fer donne des résultats tout à fait aberrants. Il faudrait mettre dans la formule une valeur de μ voisine de 100 pour rendre compte des faits. Celle-ci d'ailleurs est une fonction très rapide de l'intensité efficace, pour une même fréquence.

SÉANCE DU 2 JUIN 1905.

Présidence de M. E.-H. Amagat.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 19 mai est lu et adopté.

Les personnes qui ont été présentées dans la dernière séance sont élues Membres de la Société.

Les personnes dont les noms suivent sont présentées pour être Membres de la Société. Il sera statué sur leur admission dans la séance du 16 juin prochain.

MM. Armet (H.-I.-L.), Capitaine du Génie, à Paris.
Argyropoulos (T.-D.), Chimiste bactériologiste, à Smyrne (Turquie d'Asie).
Bernoulli (A.-L.), Assistant au Laboratoire de Physique de l'Ecole Polytechnique d'Aix-la-Chapelle (Allemagne).
Dourif (H.), Ingénieur des Arts et Manufactures, à Nîmes.
Fontaine (E.), ancien Elève de l'Ecole Polytechnique, Ingénieur conseil des Mines, à Paris.
Gibert (E.-L.-M.), Chef d'escadron d'artillerie coloniale, à Rochefort.
Hadamard (J.), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Paris.
Japy (P.-A.-J.-E.), Ingénieur des Arts et Manufactures, à Berne par Séloncourt (Doubs).
Lebert (E.), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, à Vannes.
Lorentz (H.-A.), Professeur à l'Université de Leiden (Pays-Bas).
Michel (T.), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, à Aix-en-Provence.
Mouret (G.), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, à Besançon.
Pétrovitch (M), Professeur à l'Université de Belgrade (Serbie).
Richard (P.-J.), Lieutenant au 4e régiment du Génie, à Belfort.
Royer (L.), ancien Elève de l'Ecole Polytechnique, Capitaine du Génie démissionnaire, à Paris.
Villiet (P.), Directeur des Tabacs, à Riom.
Potié, Ingénieur des Arts et Manufactures, aux papeteries du Timbre, à Thiers.

M. le Dr A. Guébhard adresse une Note sur la sensibilité des plaques photographiques; n'y aurait-il pas lieu d'établir certains rapprochements entre la courbe présentant la répartition de l'actinisme dans le spectre et la courbe représentant ce que l'auteur appelle les variations de l'action photographique en fonction d'énergies croissantes? Des rayons X très atténués ne donneraient-ils pas des résultats intéressants avec une pose *extrêmement* longue?

M. le Président annonce que la session annuelle de la Société helvétique des Sciences naturelles aura lieu à Lucerne du 10 au 20 septembre. Le Bureau accréditera ceux des Membres de la Société de Physique qui lui feront part de leur intention de se rendre à cette réunion.

Présentation d'un appareil à inscriptions graphiques, par MM. A. Dufour et J. Lemoine. — M. Abraham a utilisé la vitesse limite atteinte par un entonnoir pesant tombant dans un seau rempli d'eau pour produire le mouvement uniforme du chariot qui porte la plaque de verre ou le papier enfumé.

MM. Dufour et Lemoine réalisent quelques-unes des expériences auxquelles se prête l'appareil : 1° Etude du mouvement uniforme, inscription du mouvement d'un diapason; 2° Etude de la résistance des fluides au mouvement; 3° Inscription du mouvement d'un pendule libre, amorti par frottement solide, amorti par résistance fluide; 4° Relation entre la durée de l'oscillation d'une lame et son moment d'inertie.

L'appareil se prête d'ailleurs à toutes les inscriptions que l'on a l'occasion de faire dans les laboratoires de Physique ou de Physiologie. Il peut être construit économiquement, tout en gardant une précision suffisante pour la vérification de certains théorèmes de la Mécanique.

Sur la conductibilité des gaz issus d'une flamme, par M. Eugène Bloch. — L'auteur a établi antérieurement (1) l'existence de *gros ions* (mobilité de $\frac{1}{100}$ de millimètre) dans l'air, qui a passé sur le phosphore et dans divers gaz préparés par voie chimique. M. Langevin (2) a trouvé des ions analogues dans l'air atmosphérique ordinaire.

La Communication actuelle a pour but de montrer l'existence de gros ions dans les gaz issus d'une flamme. Ce fait était, d'ailleurs, rendu vraisemblable par les recherches déjà anciennes de M. Mac Clelland (1898).

La méthode employée a consisté à envoyer les gaz issus d'une petite flamme et complètement refroidis, à travers un condensateur cylindrique chargé. La conductibilité qu'ils y provoquent permet de construire, avec un électromètre sensible, la courbe dite *de saturation*.

Celle-ci, si l'on connaît le débit du gaz et les dimensions géométriques de l'appareil, permet très simplement de savoir : 1° si l'on a affaire à des mobilités bien définies; 2° quelle valeur est leur valeur approximative. Les résultats obtenus ont été les suivants :

A mesure que les gaz s'éloignent de la flamme, la mobilité des ions qu'ils contiennent diminue, en même temps qu'elle devient moins bien définie. Cette diminution est sans doute due à une agglomération matérielle croissante qui se forme autour du centre chargé. Cette agglomération ne prend finalement un état stable qu'au bout de 15 à 20 minutes, et la mobilité correspondante, de l'ordre de $\frac{1}{100}$ de millimètre, est bien celle qui est carac-

(1) *Séances de la Société*, février 1903 et février 1904; *Ann. de Chim. et de Phys.*, janvier 1905.
(2) *Séances de la Société*, novembre 1904 et mai 1905.

téristique des gros ions. L'absence d'intermédiaires *stables* entre gros et petits ions est ainsi confirmée, mais avec cette correction que la formation des gros ions peut être fort lente.

L'auteur termine en refaisant l'expérience connue des jets de vapeur dans les trois cas qui donnent les résultats les plus nets : phosphore, gaz de la flamme et aigrette. Les deux premiers étant dus à des gros ions, on peut se demander s'il n'en est pas de même du troisième. Il y a des raisons pour le penser et c'est ce que l'auteur se propose de vérifier.

M. Langevin profite de l'occasion qui lui est offerte par la communication de M. Bloch pour signaler quelques résultats expérimentaux qui démontrent la production d'ions de faible mobilité par les aigrettes.

Il rappelle comment son hypothèse sur la formation des gros ions de l'air par diffusion des petits ions vers les particules en suspension est confirmée par les expériences où toutes ces particules sont transformées en gros ions du même signe lorsqu'on introduit dans l'air des petits ions d'un seul signe, en particulier par action de la lumière ultra-violette sur du zinc chargé négativement. Dans ce cas, *aucun gros ion ne se forme dans l'air privé de particules par filtration préalable sur du coton*, aucune charge n'arrive à un cylindre de Faraday où l'air filtré passe après avoir traversé un condensateur cylindrique chargé de manière à recueillir tous les petits ions.

Il en est tout autrement si l'on emploie une aigrette comme source de petits ions d'un seul signe, et surtout si une étincelle est placée en tension sur l'aigrette; *de gros ions sont produits par l'aigrette dans l'air filtré*, plus facilement par la positive que par la négative. Leurs mobilités, mesurées immédiatement après leur formation, s'échelonnent depuis quelques millimètres jusque bien au-dessous de $\frac{1}{100}$ de millimètre. Ils sont donc de grosseurs très différentes et probablement constitués par des particules métalliques arrachées à la pointe, et ces particules doivent intervenir dans l'action intense de l'aigrette sur le jet de vapeur.

Robert von Helmholtz avait cru éliminer l'hypothèse précédente, et démontrer que les ions seuls agissent dans le phénomène de condensation, en montrant que l'action sur le jet de vapeur subsistait quand il entourait la pointe d'un linge ou d'un papier mouillés, qu'il pensait suffisants pour arrêter les particules pulvérisées par l'aigrette sans arrêter les ions. M. Langevin a pu constater, au moyen du cylindre de Faraday, que la production de gros ions par l'aigrette subsiste avec la pointe encapuchonnée, et qu'ici encore elle augmente d'intensité quand on intercale une étincelle en tension.

Exposé des expériences de M. Hemsalech *sur l'étincelle électrique. — Étincelle oscillante : séparation de ses composantes. — Modifications produites par des causes diverses;* par M. C. de Watteville. — M. de Watteville expose les recherches de M. Hemsalech relatives à la constitution de l'étincelle électrique. Au début de ses expériences M. Hemsalech employait pour enregistrer le phénomène une pellicule photographique fixée sur une roue à laquelle on donnait un rapide mouvement de rotation. Cette méthode, dont le principe est dû au professeur Dixon, est applicable lorsque la lumière émise par une seule étincelle est suffisante pour impressionner la pellicule. La roue faisant 120 tours par seconde, la pellicule était animée d'une vitesse linéaire de 90^m à 100^m par seconde. L'image de l'étincelle éclairait la fente d'un collimateur et l'image de cette fente était elle-même projetée, avec ou sans l'interposition d'un prisme, sur la pellicule tournante.

Ces premières expériences ont conduit aux résultats suivants :

1° Comme les images des oscillations sont équidistantes, quelle que soit

la nature des électrodes (le reste du circuit restant identique à lui-même), on en conclut que la résistance entre les électrodes ne peut constituer la partie principale de la résistance du circuit. En effet, la quantité de vapeur dégagée dans la décharge varie beaucoup avec la volatilité des électrodes et il doit en être de même pour la résistance de cette vapeur.

2° Ensuite, fait d'une très grande importance, si l'on introduit une certaine self-induction dans le circuit de décharge, le spectre subit des modifications; en particulier, les raies de l'air disparaissent. M. Hemsalech a consacré un remarquable travail à l'étude de ces modifications et de leurs rapports avec les variations des conditions du circuit de décharge.

Mais, en projetant simplement l'image de l'étincelle oscillante sur la fente du spectroscope, on n'observe qu'une synthèse de phénomènes, car le spectre obtenu résulte de la superposition des spectres élémentaires fournis par chaque oscillation. M. Hemsalech a essayé de les séparer en insufflant un courant d'air dans l'étincelle. Des expériences faites avec une simple pompe à main lui avaient déjà montré que ce procédé pourrait le conduire au résultat désiré. En effet, si l'on emploie la méthode des raies longues et courtes de Lockyer (elle consiste ici à placer perpendiculairement à la fente la ligne qui joint les électrodes) et qu'on fasse agir sur l'étincelle un courant d'air parallèle à la fente, on observe que les raies dues à la vapeur métallique sont déplacées et allongées dans le sens de leur longueur, tandis que la position du spectre de la décharge initiale ne se trouve pas affectée.

M. Hemsalech a été conduit à employer un dispositif dont on trouvera la description dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, du 27 avril 1905, et qui consiste essentiellement en deux plaques de cuivre taillées en biseau, faisant un certain angle entre elles. C'est dans l'intervalle de ces deux plaques qu'éclate l'étincelle et que circule le courant d'air.

L'apparence de l'étincelle varie avec les conditions de la décharge.

Si la résistance est grande et la self-induction faible, on a l'étincelle continue de Feddersen : le courant d'air lui donne l'apparence d'une longue flamme qui relie les électrodes.

Si, la self-induction restant faible, la résistance augmente, l'étincelle devient intermittente. L'action du courant d'air la sépare en une série d'étincelles très fines, toutes dans la même direction et analogues à celles obtenues par Feddersen dans le miroir tournant.

Enfin, l'adjonction d'une bobine de self-induction auxiliaire donne lieu à l'étincelle oscillante. Lorsque le courant d'air est bien réglé, les oscillations sont très nettement séparées et occupent la même position respective d'une décharge à l'autre, de sorte que le phénomène présente pour l'œil et la plaque photographique une apparence d'immobilité.

On peut en profiter pour vérifier des formules connues; ainsi l'espacement des oscillations permet de voir que la fréquence varie comme l'inverse de la racine carrée de la capacité, etc.

La courbure apparente des oscillations permet de mesurer la vitesse des particules d'azote qui transportent le courant électrique. Cette vitesse diminue avec l'augmentation de la capacité et elle est directement proportionnelle à la fréquence d'oscillation.

M. Hemsalech a pu également, à l'aide de ce dispositif, faire des expériences intéressantes. On sait que l'introduction d'un noyau de fer dans une bobine de self-induction fait disparaître les oscillations. Ce résultat est dû à l'action des courants de Foucault et du magnétisme du fer. Le dispositif permet d'analyser le phénomène de la façon suivante. Si l'on introduit graduellement dans la bobine de self-induction auxiliaire un cylindre creux de fer, les oscillations disparaissent l'une après l'autre. Si, le cylindre de fer restant en place, on l'entoure d'un cylindre de zinc, on voit reparaître les oscillations, mais avec une fréquence amoindrie, grâce aux courants de Foucault qui circulent à la surface du zinc. On démontre ainsi que l'action du champ ne pénètre pas au travers de la paroi de zinc.

D'autre part, si le cylindre de zinc est introduit seul dans la bobine, la fréquence d'oscillation est également augmentée; si le cylindre est fendu, les courants de Foucault ne pouvant s'établir, son action est sans effet.

De ces expériences et d'autres analogues M. Hemsalech conclut que les courants de Foucault augmentent la fréquence d'oscillation par seconde, mais sont sans influence sur le nombre d'oscillations dans chaque décharge, tandis que l'hystérésis du fer détruit les oscillations et diminue plus ou moins la fréquence.

Enfin, il suffit de projeter sur la fente du spectroscope l'image de l'étincelle ainsi décomposée pour obtenir les spectres qui correspondent à chaque oscillation. On voit, d'après les photographies obtenues, que les oscillations n'ont pas d'influence sur la luminosité de la vapeur métallique, car elle reste brillante dans l'intervalle obscur qui sépare les spectres élémentaires. Ceux-ci renferment les bandes négatives de l'azote, si la self-induction n'est pas très grande, et les bandes positives, si elle est plus forte.

Présentation d'appareils des Ateliers Carpentier : 1° *Interrupteur Wehnelt à circulation.* — 2° *Rupteur* J. Carpentier *à palette polarisée pour courant alternatif;* présentés par M. Armagnat. — M. Armagnat présente deux nouveaux modèles d'interrupteurs de bobines construits par M. Carpentier. Le premier est un interrupteur Wehnelt dans lequel la cathode est un tube de plomb qui entoure l'anode. Quand l'interrupteur fonctionne l'échauffement de l'électrolyte détermine une circulation très active dans le tube, de sorte que toute la masse du liquide est amenée successivement au contact de l'anode et que l'échauffement est très régulier.

Le second interrupteur est une combinaison du rupteur Carpentier avec un relais polarisé. Quand le relais est excité par du courant alternatif, la palette de fer du rupteur prend un mouvement exactement synchrone avec le courant, il se produit donc une rupture par période et les circuits sont disposés de telle sorte que cette rupture peut être réglée au moment précis où le courant passe par son maximum dans la bobine d'induction reliée au rupteur.

Fabrication électrolytique de fils métalliques très fins, par Henri Abraham. — Le procédé employé est assez voisin du procédé de fabrication des fils de platine dits à la *Wollaston*, et qui est bien connu.

Le fil dont on veut diminuer la section est pris comme électrode positive dans une électrolyse; on mesure de temps en temps sa résistance électrique, et l'on arrête le courant quand la section du fil a atteint la valeur voulue.

Le courant est amené à la fois aux deux bouts du fil par des tiges métalliques auxquelles le fil a été soudé. On a soin que ces tiges ne plongent pas dans le bain électrolytique pour éviter la formation de couples locaux. Le fil pend librement au-dessous de ces tiges, et il est maintenu dans le bain par deux crochets de verre auxquels on donne une forme en col de cygne afin que, lorsque l'on retirera le fil, il ne se produise pas de lame liquide mince dont la tension superficielle pourrait amener la rupture du fil.

L'expérience se fait commodément dans une cuvette photographique en porcelaine où le fil est très visible. Le fil, les tiges métalliques et les crochets de verre sont fixés sur un support en ébonite dont la forme est facile à concevoir.

Le bain doit être très dilué, afin que sa résistivité soit très grande, et que, par conséquent, le courant se distribue uniformément sur toute la longueur du fil. On emploie de l'eau distillée contenant quelques millièmes de son poids d'acide sulfurique, pour le traitement des fils de cuivre, ou bien une quantité analogue de nitrate d'argent pour le traitement des fils d'argent.

L'opération doit être conduite très lentement, afin que le sel métallique qui se forme autour du fil ait le temps de se diffuser dans le bain. Faute de cette précaution, le régime de l'électrolyse devient instable. Là où, par hasard, le courant aura été trop fort, il se sera formé un excès de sel; le bain y est donc devenu trop conducteur, le courant y augmente, et le fil est bientôt coupé. Si on laisse, au contraire, assez de temps au sel formé pour qu'il puisse se diffuser dans le bain, le régime de l'électrolyse est stable. Ce sont en effet les parties les plus épaisses du fil qui sont rongées de préférence, puisque c'est au voisinage de ces points que la résistance de la couche liquide voisine est la plus faible. Les intensités de courant qui conviennent sont de l'ordre du centième d'ampère par centimètre carré de surface de fil. On diminue l'intensité à mesure que le fil devient plus fin : la fabrication d'un bon fil peut durer une demi-heure.

Voici deux exemples de résultats très faciles à obtenir.

Nous caractériserons chaque fil par le couple nécessaire pour en tordre une longueur de 10^{cm} de l'angle de $\frac{1}{2000}$ qui correspondrait à une déviation de 1^{mm} à 1^{m}.

1° Fil de cuivre rond, diamètre initial : 21 microns. Le traitement électrolytique a été poussé jusqu'à ce que sa résistance fût devenue 4,5 fois plus grande :

Valeur du couple avant traitement.....	0,000060 dyne-centimètre
Valeur du couple après traitement.....	0,000003 dyne-centimètre

2° Fil plat en bronze phosphoreux ayant près de $\frac{2}{10}$ de millimètre de large sur un peu plus de $\frac{1}{100}$ de millimètre d'épaisseur. Le traitement électrolytique a été continué jusqu'à ce que sa résistance fût devenue douze fois plus forte :

Valeur du couple avant traitement.....	0,0008 dyne-centimètre
Valeur du couple après traitement.....	0,000006 dyne-centimètre

Les fils traités avec les précautions indiquées conservent une homogénéité suffisante pour qu'on puisse calculer approximativement leur nouvelle charge de rupture, tout simplement en divisant leur charge de rupture ancienne par le rapport de leur résistance électrique actuelle et de leur résistance électrique initiale.

SÉANCE DU 16 JUIN 1905.

PRÉSIDENCE DE M. E.-H. AMAGAT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 2 juin est lu et adopté.

Les personnes qui ont été présentées dans la dernière séance sont élues Membres de la Société.

Le résumé de la Note de M. A. GUÉBHARD, que M. le SECRÉTAIRE GÉNÉRAL avait inséré dans le précédent procès-verbal, n'ayant pas rendu d'une ma-

nière satisfaisante la pensée de M. A. Guébhard, M. le Secrétaire général donne ci-dessous, et *in-extenso*, le texte même de la Note dont il s'agit :

Questions d'énergétique photographique. — 1° Etant donné que la courbe classique qui représente la répartition de « l'actinisme » dans le spectre est, par sa forme, tout à fait analogue à celle qui représente les valeurs de l'action photographique en fonction d'énergies croissantes, n'est-on pas en droit de se demander si la répartition de l'énergie dans le spectre lui-même, au lieu d'avoir pour image les ordonnées de cette courbe, ne serait point plutôt corrélative des abscisses, c'est-à-dire d'une courbe sans changement de signe de la dérivée, qui, partie de l'extrême infra-rouge et passant outre à l'extrême ultra-violet, aurait pour *plus ultra* les rayons X, et peut-être point pour *nec plus ultra* les dernières en date d'entre les *radiances ?*

2° S'il en était ainsi, et que, par conséquent, l'action des rayons X correspondît à la deuxième, et non à la première ascension ondulatoire de la courbe photographique fonctionnelle, ne semblerait-il pas qu'il dût y avoir tout intérêt à ramener leur action, par une suffisante atténuation (si toutefois elle est réalisable sans dénaturation), sur l'une ou l'autre partie, descendante ou ascendante, de la première ondulation, sans se laisser arrêter, dans ce mouvement régressif, par la *très longue* durée de la passe intermédiaire d'action quasi-nulle ?

3° Enfin, au point de vue optique, n'y aurait-il point, dans une admission rationnellement dosée de l'ultra-violet, une solution indiquée de certaines instantanéités ?

M. L. Benoist, en présentant une Note récente sur les mesures dans les applications médicales de l'électricité statique, signale l'intérêt qu'il y aurait à donner un nom à l'*unité C.G.S. électrostatique de quantité d'électricité*. Il propose de choisir pour cette unité le nom de Franklin, dénomination qui paraît d'autant mieux justifiée que l'emploi médical de l'électricité statique a déjà reçu le nom de *franklinisation*.

Photographies en couleurs du spectre négatives par transmission; par M. G. Lippmann. — On sait que l'on obtient la reproduction photographique des couleurs en employant une couche sensible de nature quelconque, pourvu qu'elle soit transparente, et adossée, pendant la pose, à un miroir de mercure. Les couleurs du modèle sont visibles par réflexion après développement de la plaque.

La nature de la couche sensible est d'ailleurs indifférente : on obtient des couleurs soit avec des couches de gélatinobromure d'argent, soit avec des couches de gélatine ou d'albumine, ou de cellulose bichromatée (1).

Quand la couche sensible est formée d'une pellicule bichromatée, on la fixe par un simple lavage à l'eau : les couleurs apparaissent en même temps, visibles tant que la couche est humide. Elles disparaissent par dessiccation et reparaissent chaque fois que l'on rend de l'humidité à la plaque (2).

---

(1) Pour opérer sur cellulose, on fait dissoudre cette substance dans la liqueur de Schweizer, on coule sur verre. Après que la couche a fait prise, on la décolore par un lavage à l'acide chlorhydrique étendu; puis on l'imbibe de bichromate de potasse à 3 ou 4 pour 100 et on la fait sécher. La couche sèche est exposée dans le châssis-presse à mercure, jusqu'à ce que la trace de l'image soit visible en brun. Il ne reste plus qu'à laver la plaque à l'eau pure, pour enlever le bichromate : les couleurs apparaissent en même temps.

(2) Dans le cas de la gélatine, qui se gonfle fortement, il ne faut pas remouiller complètement la plaque, mais l'humecter avec l'haleine, ou mieux la passer à l'alcool.

Ce phénomène tient sans doute à l'action exercée par la lumière sur les propriétés hygrométriques de la pellicule. La substance bichromatée devient moins gonflable par l'eau, partout où l'action lumineuse a été plus forte, c'est-à-dire dans les maxima d'interférence. L'humidité rend la plaque hétérogène au point de vue physique et optique en se répartissant dans sa masse suivant une loi périodique.

L'auteur s'est demandé si l'on ne pouvait pas remplacer, dans cette expérience, l'eau, qui s'évapore, par une matière solide et fixe.

Il a imbibé la plaque, non plus d'eau pure, mais d'une dissolution aqueuse d'iodure de potassium; après séchage les couleurs subsistent encore mais faiblement visibles; l'iodure de potassium est donc demeuré dans la plaque en se partageant inégalement entre les maxima et les minima d'interférence.

Vient-on à verser sur les couches ainsi chargées d'iodure de potassium à l'état sec une dissolution de nitrate d'argent à 20 pour 100, les couleurs deviennent extrêmement brillantes : on peut ensuite laver la plaque et la faire sécher ; les couleurs subsistent après séchage avec tout leur éclat.

Il s'est sans doute formé de l'iodure d'argent qui demeure inégalement réparti dans l'épaisseur de la pellicule. Mais celle-ci demeure transparente et l'iodure est dissimulé à l'état de solution dans la couche solide; il n'en produit pas moins un renforcement des couleurs, qui subsistera après le séchage.

En outre, on constate, sur les épreuves présentées à la Société, que les couleurs vues par transparence sont changées en leurs complémentaires, et que les négatifs ainsi obtenus sont brillants. Si l'on arrivait quelque jour à obtenir le même résultat en partant, non plus de couches bichromatées, qui sont peu sensibles et peu isochromatiques, mais de pellicules au gélatinobromure, on pourrait multiplier les épreuves en couleurs par tirage au châssis-presse, comme dans le cas de la photographie ordinaire.

M. Cotton projette les couleurs par transmission d'une photographie du spectre, faite sur plaque aux sels d'argent traitée par le chlorure mercurique, que M. Izarn lui avait donnée en 1894. Cette épreuve a conservé depuis cette époque, *à la fois* ses très belles couleurs par réflexion, et des teintes par transmission moins brillantes que celles que M. Lippmann obtient par son procédé à la gélatine bichromatée et iodurée, mais bien visibles cependant.

M. Cotton indique à ce sujet que lorsqu'on regarde, à travers un analyseur, une telle épreuve placée obliquement, les couleurs s'avivent lorsque l'analyseur est orienté de façon à favoriser les rayons subissant des réflexions successives dans l'intérieur de la pellicule. L'emploi d'un analyseur a permis de voir les teintes par transmission prévues par la théorie de M. Lippmann dans des épreuves où on ne les apercevait pas autrement.

Sur quelques particularités de l'osmose des solutions aqueuses. Dispositifs employés. Résultats obtenus, par M. G. Dorléans. — Un support de burette de Mohr sert de soutien à un tube en cristal de 1^{cm^2} de section. C'est dans ce tube, fermé par une membrane, que l'on introduit la solution à étudier.

La partie inférieure du tube, fermée par la membrane, est immergée dans l'eau distillée.

Des prises d'essai étant faites au bout d'un certain temps, on analyse les liquides, et l'on peut se rendre compte des mouvements qui ont eu lieu à travers la membrane.

Ce dispositif permet la détermination du *coefficient de passage* que l'auteur définit de la façon suivante :

Coefficient de passage. — La quantité de substance, exprimée en grammes, qui passe pendant l'unité de temps à travers une membrane ayant une surface égale à l'unité, à une température et pour une membrane, une concentration de la solution et une hauteur du liquide au-dessus du système données.

Le Tableau ci-dessous résume une série d'expériences sur des solutions de *chlorure de sodium* avec une membrane en baudruche. Chaque expérience durait 2000 secondes et la hauteur du liquide au-dessus du septum était toujours de 10^{cm}.

Titre de la solution.	Température ambiante.	Volume du liquide dans la cuvette au début de l'expérience.	Volume du liquide dans la cuvette à la fin de l'expérience.	Coefficient de passage.	Solution correspondante pour 100.
	°	cm³	cm³		
Saturée.....	9,5	10	9,3	0,000058	13,92
160 p. 100..	14	»	9,7	0,000044	9,36
80 » ..	12	»	9,9	0,000022	4,68
40 » ..	16	»	10	0,000011	2,34
20 » ..	19	»	10,1	0,000005	1,17
10 » ..	10	»	10,1	0,0000002328	0,468
5 » ..	10	»	10,1	0,0000001274	0,257
2,50 » ..	10	»	10,1	0,0000000590	0,117

La dernière colonne intitulée : *solution correspondante,* donne le titre de la solution de chlorure de sodium qui correspond à la quantité de chlore trouvée pour le contenu de la cuvette à la fin de l'expérience.

L'étude comparée de la conductibilité électrique de cette solution et de celle du liquide résultant de l'expérience pourra présenter un certain intérêt au point de vue du passage des ions de la solution étudiée.

M. G. Dorléans se propose dans une prochaine Communication de revenir sur ce point ainsi que sur les rapports entre la quantité d'eau qui pénètre dans le tube à osmose et l'ionisation de la solution étudiée, les variations du coefficient de passage en fonction de la concentration de la solution et de son ionisation, etc.

SÉANCE DU 7 JUILLET 1905.

PRÉSIDENCE DE M. RENÉ BENOIT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 16 juin est lu et adopté.

Sont élus membres de la Société :

MM. APPELL, Membre de l'Institut, Doyen de la Faculté des Sciences de Paris.
ARIÈS (Emmanuel), Lieutenant-Colonel du Génie en retraite, à Versailles.
BERGERON (Louis), Ingénieur-électricien (maison Farcot et Cie, Saint-Ouen), à Clichy (Seine).
BEGIN (l'abbé Pierre-Achille), Professeur au Séminaire Saint-Charles-Borromée, à Sherbrooke (Canada).

MM. Boberil (le Vicomte Roger du), Membre de la Société mathématique de France, à Rennes.
Boyer (Maurice-Gaston), Ingénieur des Arts et Manufactures, au Havre.
Castaing-Alfaro (Louis), Juge en premier ressort au criminel du département d'Alajuela et membre de la Société de Photographie, à Alajuela (République de Costa-Rica).
Danne (Jacques), Préparateur à la Faculté des Sciences de Paris.
Escoffier (Honoré), Professeur au Collège d'Antibes.
Felix (Venceslas), Phil. Dr Professeur à l'Ecole Polytechnique tchèque de Prague (Autriche).
Féry (Charles), Professeur à l'Ecole de Physique et de Chimie industrielles de la ville de Paris.
Florentin (Gabriel), Ingénieur aux Forges et Aciéries du Donetz, à Droujkowka, gouvernement d'Ekaterinoslow (Russie).
Fontaines (Ernest de), Ingénieur des Arts et Manufactures, à Morvillars (Haut-Rhin français).
Frémont Saint-Chaffray (Mme B.), à Paris.
Guccia (G.-B.), Professeur de Géométrie supérieure à l'Université de Parme, Directeur des *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo*, à Palerme (Italie).
Guillaume (Edouard), Privat docent, Chef des travaux pratiques à l'Académie de Neuchâtel (Suisse).
Hamilton (Georges-A.), Ingénieur-électricien, New-Jersey (U. S. A.).
Hasenöhrl, Privat docent de Physique à l'Université de Vienne (Autriche).
Hernandez (Pedro), Professeur de l'Instruction primaire et secondaire, à Morella Michoacan (Mexique).
Kolowrat, Licencié ès Sciences, à Paris.
Muynck (René de), Professeur à l'Université de Louvain (Belgique).
Nicolalaïdeo (Emmanuel-C.), Ingénieur-électricien, à Zurich (Suisse).
Péridier (Julien), Ingénieur des Arts et Manufactures, à Paris.
Rostaing (E.-L.-B.), Chef d'escadron d'artillerie en retraite, à Bourg.
Routin (Joseph-Louis), ancien Elève de l'Ecole Polytechnique, Ingénieur-Conseil, à Lyon.
See (Thomas-Jefferson-Jackson), A. M. Ph. D. Bexol, Professor Mathematics U. S. Novy, naval Observatory, Mare Island, California, U. S. A.
Séguin (Jules-Auguste), Chef mécanicien de garantie à bord du paquebot *Romania*, à Constanza (Roumanie).
Sparre (Comte M.-L. de), Doyen de la Faculté catholique des Sciences de Lyon.
Zalce (Ramon-L.), à Morella (Mexique).
Zervos (Paniotis), Docteur ès sciences, Professeur de Mathématiques, à Athènes (Grèce).
Zeeman, Professeur à l'Université d'Amsterdam (Pays-Bas).

M. le Président annonce la perte douloureuse que la Société vient de faire en la personne de M. *Charles-Emile Guerre*, Constructeur-Electricien.

M. le Secrétaire général annonce qu'un Congrès de radiologie et d'ionisation aura lieu à Liège du 12 au 14 septembre 1905. Un Comité d'honneur, composé des savants les plus éminents des diverses nationalités, patronnera ce Congrès. Le Comité français, présidé par M. Henri Becquerel, sous la présidence d'honneur de MM. Berthelot, Bouchard et Mascart, fait appel aux physiciens français pour adhérer à ce Congrès. Un grand nombre de Communications de divers savants étrangers sont déjà annoncées.

Les Membres de la Société qui désireraient faire partie du Congrès ou y présenter des Communications, sont invités à s'adresser à M. J. Daniel, Secrétaire général du Congrès, 9, boulevard Rogier, à Ostende.

Des réductions de 50 pour 100 sur les chemins de fer français et belges seront accordées aux congressistes par l'intermédiaire de M. Daniel.

M. Castex adresse une Note sur un *Dispositif pour inscription graphique*.

Le chariot qui porte la plaque de verre enfumé se meut sur une glissière. Il peut être entraîné par une ficelle qui fait un tour et quart sur l'arbre d'un petit moteur. Dès qu'on suspend un poids à la ficelle, le chariot se met en marche; il s'arrête quand le poids arrive sur le sol.

Méthodes employées au Laboratoire d'essais du Conservatoire National des Arts et Métiers pour l'étude des objectifs photographiques; par M. E. Langlet. — Les caractéristiques étudiées sont les suivantes :

1° Distance focale principale;
2° Rapport d'ouverture utile maximum;
3° Foyer chimique;
4° Profondeur de foyer pour la netteté $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{20}$ de millimètre;
5° Finesse au centre;
6° Courbures des surfaces focales d'astigmatisme;
7° Rayon de la surface nettement couverte au $\frac{1}{10}$ ou au $\frac{1}{20}$ de millimètre;
8° Angle du champ correspondant;
9° Distorsion;
10° Centrage des verres.

La distance focale principale se détermine à l'aide d'un focomètre spécial construit par M. Pellin sur les indications de M. Perot, directeur du Laboratoire. Le principe de cet appareil est le suivant : On observe dans une lunette à réticule pointée sur l'infini l'image donnée par l'objectif à étudier d'une mire divisée placée à son foyer. La lunette a été graduée angulairement, c'est-à-dire qu'on a déterminé à quel déplacement angulaire de l'axe optique correspondait un déplacement donné du réticule. Soit d la longueur d'une division de la mire, α l'angle que font entre eux les rayons issus de ses deux extrémités, et f la distance focale cherchée, on a:

$$f = \frac{d}{\alpha}.$$

Ce focomètre permet de déterminer des distances focales jusqu'à 7 mètres.

Pour mesurer l'ouverture utile maximum on place par une autocollimation un petit trou fortement éclairé au foyer principal de l'objectif et l'on détermine le diamètre du faisceau émergent à l'aide d'un viseur spécial. Ce viseur est constitué par un corps de lunette portant à l'avant une glace argentée; sur cette glace on a tracé un trait fin horizontal et diamétral suivant lequel l'argenture a été enlevée; à l'arrière est un simple œilleton.

Ce viseur peut se déplacer verticalement à l'aide d'une crémaillère et porte une graduation en millimètres avec vernier au $\frac{1}{20}$. On amène, par autocollimation, l'axe du viseur à être parallèle au faisceau émergent de l'objectif et l'on amène successivement le trait fin à être tangent aux deux bords du faisceau.

On a adopté, pour définir la netteté, la définition de M. le commandant Houdaille. On détermine du même coup le foyer chimique, la profondeur de foyer et la finesse en photographiant un focimètre dont chaque secteur porte une série de voyants de netteté.

Les surfaces focales d'astigmatisme et la distorsion se déterminent par une méthode dérivée de celle de M. Ch. Féry. On photographie une mire quadrillée sur une plaque sensible inclinée à 45° sur l'axe de l'objectif. Les lieux des maximums de netteté pour les lignes verticales et pour les lignes horizontales de la mire représentent les sections des deux surfaces focales

par la glace sensible. On en déduit facilement la forme des méridiennes de ces surfaces.

Cette détermination est faite par réduction au $\frac{1}{5}$.

Le rayon de courbure d'une surface focale secondaire est lié au rayon de courbure de la surface focale principale par la formule

$$R = R_\infty \frac{p - f}{p - f' \cos\alpha},$$

p étant la distance, comptée sur l'axe principal, de la mire à l'objectif, f la distance focale principale, f' la distance focale pour des rayons faisant un angle α avec l'axe principal.

La mire est réduite au $\frac{1}{5}$ et l'équation devient :

$$R_{\frac{1}{5}} = R_\infty \frac{5f}{6f - f' \cos\alpha}.$$

Pratiquement on peut toujours admettre

$$R_{\frac{1}{5}} = R_\infty.$$

La connaissance des surfaces focales d'astigmatisme et de la profondeur de foyer pour une netteté donnée permet de trouver la surface plane couverte.

La distorsion se déduit de l'examen des divisions de la ligne verticale centrale.

La mire, dessinée au tire-ligne et collée par une glace de Saint-Gobain, a comme dimensions $2^m \times 2^m,50$. Le matériel du Laboratoire lui permet d'étudier les objectifs sur des plaques atteignant $60^{cm} \times 70^{cm}$.

Les objectifs étudiés reçoivent une note d'appréciation tenant compte à la fois de leurs qualités intrinsèques et de l'usage auquel ils sont plus particulièrement destinés.

Sur les phénomènes de l'arc chantant, par M. A. Blondel (présentée par M. J. Blondin).— I. Pour étudier le mécanisme intime de l'arc chantant, M. Blondel a utilisé la méthode oscillographique : trois oscillographes bifilaires convenablement disposés donnent la tension aux lames de l'arc, l'intensité du courant qui le traverse et enfin celle du courant de charge du condensateur (16 microfarads) monté en dérivation sur l'arc.

II. L'examen des nombreux clichés obtenus a permis de constater qu'il existe deux régimes d'arcs chantants. L'un est caractérisé par des courbes de courant à travers l'arc indiquant le passage d'un courant toujours de même sens et ne s'annulant pas, tout au moins pendant une fraction appréciable de la durée de la période; à ce régime, l'arc rend un son nettement musical. Le second régime est caractérisé par une annulation du courant à travers l'arc, parfois même un renversement de ce courant, et, par suite, par une extinction de l'arc: le son rendu est sifflant, strident, bien que cependant la fréquence des courbes puisse être plus faible dans ce régime que dans le premier.

Le régime musical exige un écart entre charbons plutôt fort et une intensité de courant pas trop voisine de l'intensité limite de stabilité de l'arc; il se produit plus facilement si le circuit d'alimentation est peu ou pas inductif. Le régime non musical demande un écart faible entre charbons; il se produit plus facilement si le circuit d'alimentation est inductif, mais cette condition n'est pas indispensable.

Souvent il est possible de passer d'un régime à l'autre sans difficultés; ainsi, on parvient à passer du régime non musical au régime musical simplement en augmentant l'écart entre charbons, pourvu que le circuit d'alimentation soit peu inductif.

III. Nos connaissances actuelles sur les phénomènes dont l'arc électrique est le siège permettent-elles d'expliquer les formes de courbes que donnent les arcs chantants? S'appuyant sur les résultats des travaux de Mme Hertha Ayrton, M. Blondel montre qu'il en est bien ainsi.

IV. M. Blondel étudie ensuite les phénomènes qui accompagnent l'extinction de l'arc dans le régime non musical et montre que toutes les particularités des courbes relevées par les oscillographes s'expliquent facilement par le calcul.

V. Enfin M. Blondel établit que l'arc chantant non musical présente, pour les basses tensions, tous les caractères des décharges oscillantes à haute tension entre les électrodes métalliques.

Les nouvelles méthodes de mesure des bases géodésiques. Recherches de MM. Benoit *et* Guillaume *sur les mesures par fils tendus; matériel de mesure des bases construit avec la coopération de M.* Carpentier, par M. Ch.-Ed. Guillaume. — Le développement historique des procédés de mesure des bases géodésiques dans le dernier siècle comprend deux périodes. Dans la première, on a cherché à augmenter la précision; dans la seconde, on s'est attaché à diminuer les frais en réalisant des vitesses plus grandes. La presque totalité des mesures précises a été faite, jusqu'à ces dernières années, à l'aide de règles étalons dont les positions successives, dans la ligne de la base, étaient repérées par des microscopes dont chacun se trouvait alternativement à l'avant et à l'arrière de la portée mesurée. Les règles elles-mêmes, généralement de 4^m de longueur, étaient ou monométalliques et accompagnées de thermomètres, ou bimétalliques (Règles de Borda et Lavoisier, de Porro, de Brunner), la différence des deux étalons indiquant dans chaque portée, leur température, et, par conséquent, la valeur de la règle principale.

Les mesures faites à l'aide des règles bimétalliques exigent la présence simultanée sur le terrain de cinquante hommes environ, et la vitesse de marche est de 100 portées par jour, soit 400 mètres mesurés. La mesure d'une base de longueur normale (une dizaine de kilomètres) exige donc, pour l'aller et le retour, près de deux mois.

A la suite de la découverte de l'*invar*, MM. Benoît et Guillaume ont établi, pour le Service géographique de l'Armée française, à la demande de M. le général Bassot, les plans d'un étalon nouveau, en alliage peu dilatable, à section en H de 40^{mm} au côté, tracé sur le plan des fibres neutres, et porté par deux points seulement. Cet étalon est enfermé dans une caisse d'aluminium, et est muni des organes accessoires rendant son maniement facile et sûr. Quatre autres étalons semblables ont été construits ultérieurement, pour le Bureau international, les Services géodésiques du Japon, du Mexique et de l'Egypte, et deux autres pour les Services des Poids et Mesures d'Allemagne et de Russie. Plusieurs de ces étalons sont actuellement à l'essai, et l'on estime que la vitesse de marche, dans leur emploi, est deux fois plus grande qu'avec l'appareil bimétallique, avec un personnel réduit de moitié, soit une économie des trois quarts dans la mesure d'une base.

Mais les études principales de MM. Benoît et Guillaume ont porté sur l'emploi des fils tendus pour la mesure des bases. Cette méthode, proposée en 1884 par M. Jäderin, avait été élaborée d'abord comme méthode

bimétallique, chaque portée étant mesurée successivement à l'aide d'un fil d'acier et d'un fil de laiton. Les fils ont normalement 24^m de longueur, multiple commode de la longueur des règles géodésiques qui servent à vérifier les fils. Dans le système de M. Jäderin, la tension était contrôlée par des dynamomètres, et le nivellement effectué à l'aide d'un appareil auxiliaire, extérieur à la ligne de la base.

Les fils d'invar à dilatation sensiblement nulle, fournis par les aciéries d'Imphy, ont fait entrevoir la possibilité de simplifier beaucoup la méthode en augmentant énormément sa précision par la suppression de l'erreur de température.

Les travaux de MM. Benoît et Guillaume ont porté d'abord sur les conditions de construction et de conservation des fils. Les réglettes divisées qui les terminent ont leur arête dans le prolongement de l'axe du fil. On les amène, pour leur étude, contre des repères fixés à un mur intérieur en sous-sol dans l'observatoire du Bureau international des Poids et Mesures, où ils sont soumis à la tension constante de 10^{kg}. Ces études, qui ont été poursuivies sans interruption depuis plus de quatre ans, et pour lesquelles, rien que dans les deux dernières années, il a été fait (avec la coopération de MM. Maudet et Tarrade) plus de 150000 lectures, ont consisté à soumettre les fils, par séries, à toutes les causes possibles de variations, tandis que des séries de fils étaient conservées à l'abri du changement.

Le mur n'est considéré, en général, que comme fournissant une longueur constante pour l'intervalle de temps assez court qui sépare sa vérification, au moyen des fils de contrôle, de la mesure des fils étudiés. Cependant, ses variations avec le temps ont été trouvées d'une parfaite régularité, et dépendantes de la température au point que la longueur du mur peut être calculée très approximativement en partant de sa température et de son coefficient de dilatation, déterminé par les observations poursuivies sans interruption en toutes saisons.

Les observations ont pris leur maximum de régularité surtout depuis un an. La valeur relative du mur et de six fils de contrôle en invar est, à l'époque actuelle, la même *au millionième près* que l'année dernière à la même époque et pour une même température du mur.

Un grand nombre de fils, conservés pendant des années, ont montré entre eux des concordances du même ordre.

Les fils étudiés ont été soumis essentiellement à des tensions excessives, à des enroulages et déroulages répétés, à des enroulages de longue durée et à des battages produisant des vibrations très énergiques.

Les fils bien écrouis supportent sans variations résiduelles mesurables des tensions de 20^{kg} (section $2^{mm^2},2$) et ne commencent à manifester des variations que sous 30^{kg}. Sous 60^{kg}, les variations résiduelles sont, au bout de 24 heures, de l'ordre de $\frac{1}{100000}$. La rupture se produit sous 180^{kg} environ.

Les enroulages pratiqués sur des fils qui ont été soumis à des tensions excessives produisent des raccourcissements qui s'atténuent et s'annulent sensiblement après 5 à 10 enroulages. Ensuite, les enroulages peuvent être pratiqués par centaines sans montrer de changements, à la condition que le rayon de la couronne soit suffisant ($0^m,50$ au moins). Le fait, pour un fil, de rester enroulé pendant plusieurs mois, ne produit pas de variation de l'ordre du millionième de sa longueur. En revanche, les battages des fils les raccourcissent, suivant un mode qui va en s'atténuant à mesure que les secousses se multiplient. Le battage apparaît ainsi comme éminemment propre à assurer la stabilité ultérieure de longueur des fils. Il est pratiqué sur tous les fils neufs.

Pour les appareils d'emploi sur le terrain, MM. Benoît et Guillaume ont posé le principe de la tension par des poids, de l'enroulage du fil sur un tambour, de la mise en place micrométrique des repères du report direct

sur le terrain à l'aide d'un fil à plomb, enfin du nivellement par une lunette portée par le repère lui-même.

Les appareils réalisés avec la coopération de M. Carpentier contiennent tous ces principes, et permettent un travail rapide et très précis. Le personnel employé à la mesure d'une base ne se compose plus que de 10 à 12 hommes, et la vitesse de marche en bon terrain est de 5^{km} par jour. Le gain, par rapport aux anciens procédés, est donc supérieur à 98 pour 100.

Des mesures nombreuses faites depuis quelques années, soit au Bureau International, soit par des services géodésiques, ont montré que la concordance des diverses mesures d'une base est de l'ordre du millionième. La précision est donc parfaitement suffisante pour les besoins de la haute géodésie.

Les appareils nouveaux ont été adoptés déjà par un grand nombre de services géodésiques, et des bases nombreuses ont été récemment mesurées, ou vont l'être, au moyen de fils d'invar, en Allemagne, en Egypte, dans la République de l'Equateur, en France, au Japon, à Madagascar, au Mexique, en Norvège, dans la République Argentine, la Roumanie, le Pérou, le Sénégal, le Sud-Africain, la Serbie, le Spitzberg, la Suisse, le Tonkin. L'examen des fils destinés à ces mesures constitue déjà un travail important pour le Bureau international, puisque, en dehors des études d'intérêt général, la détermination complète de plus de 100 fils a été faite dans les trois dernières années. Les renseignements fournis par les géodésiens qui les ont employés ne laissent aucun doute sur les services qu'ils sont appelés à rendre dans la mesure de la Terre.

Le lieutenant-colonel Bourgeois, Chef de la Section de Géodésie du Service géographique, croit devoir appuyer les conclusions de M. Guillaume. L'introduction du métal invar dans la construction des appareils de base a permis de réaliser des instruments d'un maniement économique et d'une grande facilité de manœuvre. Les géodésiens pourront donc réaliser deux de leurs desiderata les plus importants : mesurer des bases très longues sans grands frais et tracer la direction de ces bases en se préoccupant surtout des conditions du rattachement au réseau.

Les appareils à fils du nouveau type réalisé au Bureau international des Poids et Mesures sont parfaits et construits avec un soin tout particulier par M. Carpentier. La seule observation que l'on puisse faire est que l'appareil de nivellement ne permet pas d'aborder des pentes un peu raides, ce qui peut se présenter aux Colonies. Il faudrait, à ce qu'il semble, compléter l'appareil par une mire et un niveau analogues à ceux autrefois employés par M. Jäderin et qui serviraient dans les cas exceptionnels.

Le lieutenant-colonel Bourgeois rappelle en terminant que les fils ont été employés en Equateur pour la mesure des bases et que l'on a pu, lors de la mesure de la base fondamentale de Riobamba, qui a été déterminée, d'une part, avec l'appareil de Brünner, et, d'autre part, avec les fils, comparer les valeurs résultant de cette dernière mesure avec celles fournies par l'appareil bimétallique. L'accord a été de $\frac{1}{3\,000\,000}$, et bien que, dans une coïncidence aussi parfaite, on doive mettre une part « d'heureux hasard », il n'en est pas moins vrai que cela montre le parti que l'on peut tirer des nouveaux instruments.

M. Guillaume répond que, en effet, la lunette de nivellement n'a été prévue que pour des pentes maxima de 10 pour 100. Et même, comme l'échelle intérieure à la lunette et l'image de la mire ne se trouvent pas exactement dans le même plan sur les bords du champ, les lectures faites pour des pentes supérieures à 5 ou 6 pour 100 peuvent comporter des erreurs sensibles et ne peuvent être recommandées qu'à titre de renseignements. Mais on a prévu, dans le matériel normal, une mire prolongée de

96cm ou de 4 pour 100 de la pente pour une portée de 24m, permettant ainsi de faire de bonnes lectures pour des pentes, déjà très exceptionnelles sur un bon terrain de base, de 10 pour 100. Si l'on avait à mesurer des pentes supérieures, il ne resterait évidemment pas autre chose à faire que de recourir au procédé primitif de M. Jäderin, mais, pour toutes les mesures faites sur des terrains dont l'inclinaison n'est pas excessive, et qui représentent l'immense majorité des cas, on devra préférer le procédé nouveau, beaucoup plus rapide et réalisant une économie de 3 ou 4 personnes, soit d'un quart du personnel employé à la mesure.

SÉANCE DU 17 NOVEMBRE 1905.

PRÉSIDENCE DE M. E.-H. AMAGAT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.
Le procès-verbal de la séance du 7 juillet est lu et adopté.

Les personnes dont les noms suivent sont présentées pour être Membres de la Société. Il sera statué sur leur admission dans la séance du 15 décembre prochain.

MM. ALIAMET, Ingénieur, chef du Laboratoire électrotechnique au chemin de fer du Nord, à Asnières.
D'ANTONAY (L.), Ingénieur des Arts et Manufactures, Expert près le tribunal civil, à Paris.
AUBERT (A.), Professeur de Physique au Lycée de Toulouse.
BARBE (E.), Lieutenant du Génie, à Verdun.
BELIN (E.), Administrateur de la Société des Imprimeries réunies, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).
BIERNACKI (V.), Professeur à l'Ecole Polytechnique (Institut de Physique), à Varsovie (Russie).
BLANC (A.), Maître de conférences à la Faculté des Sciences de Rennes.
BRINER (E.), Docteur ès Sciences, Privat docent à l'Université de Genève (Suisse).
BRISSONNET (J.-G.-C.), Professeur suppléant aux Ecoles de Médecine et de Pharmacie, à Paris.
BRUNSWICK, Ingénieur principal, chef du Service technique de la Maison Bréguet, à Paris.
CLOAREC, Chef des Travaux pratiques de Physique à la Faculté des Sciences de Rennes.
COSSERAT (E.-M.-P.), Professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse.
DELSOL (E.), Ingénieur civil, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, à Paris.
DANIEL (J.), Ingénieur, Directeur spécial de l'Université de Bruxelles (Belgique).
DIRECTEUR (Le) de l'Ecole Normale supérieure d'Enseignement primaire (Instituteurs), à Saint-Cloud.
FOUARD (E.), Ingénieur des Arts et Manufactures, attaché à l'Institut Pasteur, Paris.
FOURNEL, Professeur à l'Ecole pratique d'Industrie, à Marseille.
GUERPILLON (A.), Professeur au Lycée de Toulouse.
HONDA (K.), Rigakuhakushi, Lecturer of Physics, Tôkyo, Imp. University (Japon).
HELLE (A.), Directeur chimiste à la Rhenania, à Stolberg (Allemagne).
IRAGUE (J.), Chargé des cours de Physique au Lycée de Cahors.

MM. Jaquerod (A.), Docteur ès Sciences à la Faculté des Sciences de Neuchâtel (Suisse).
Kock (R.), Ingénieur civil, à Paris.
Leigh (C.-D.-E.), The University, Manchester (Angleterre).
Lenard (P.), Docteur en Philosophie et Médecine, Professeur à l'Université de Kiel (Allemagne).
Meissonnier (L.), Chef des Travaux de Physique à la Faculté des Sciences de Marseille.
Pastouriaux, Préparateur à l'Ecole Normale supérieure d'Enseignement primaire (Instituteurs), à Saint-Cloud.
Proumen (H.), Ingénieur civil des Mines, Professeur à l'Ecole Industrielle Ixelles-Bruxelles (Belgique).
Ricardo Yesares Blanco, Ingenior Electricita y Escritor tecnico, à Madrid (Espagne).
Seligmann (M.), Professeur à l'Athénée Royal de Bruxelles (Belgique).
Sociedad de Ingenieros, à Lima (Pérou).
Soyer (A.), Professeur au Lycée de Tournon.
Suzor (G.-W.), Ingénieur, fabricant de plaques, pellicules et papiers photographiques, Esunohazu. Yodobashi Machi Shinjuku, Tokyo (Japon).
Terada (T.) Rigakuski, Lecturer of physics, Physical Institute, College of Science, Tokyo (Japon).
Tian, Préparateur de Physique industrielle à la Faculté des Sciences de Marseille.
Trippe (P.), Professeur au Lycée de Roanne.
Wengler (M.). Docteur ès Sciences, Professeur au Gymnase, à Echternach (Grand Duché de Luxembourg).
Younès (R.), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur adjoint à l'Ingénieur en Chef, Ligne du Yunnan, par Laokay (Tonkin).

M. le Président annonce la mort de *Ernest Bichat,* Doyen de la Faculté des Sciences de Nancy, Correspondant de l'Académie des Sciences, ancien membre du Conseil de la Société.

Physicien distingué, la Science doit à E. Bichat un certain nombre de travaux estimés; ses recherches sur la polarisation rotatoire magnétique dans les gaz et les vapeurs, notamment, sont restées classiques; on a aussi de lui plusieurs recherches faites en collaboration avec M. Blondlot, en particulier des études très intéressantes sur la décharge oscillante et le temps d'extinction des phénomènes de Kerr et de polarisation rotatoire et l'électromètre cylindrique absolu.

Conférencier remarquable, E. Bichat était plus remarquable encore comme organisateur; par l'étendue de ses relations, l'autorité qu'il avait acquise dans la contrée et son dévouement infatigable, il avait puissamment contribué à faire de la Faculté des Sciences de Nancy l'une des plus richement dotées, et peut-être la mieux installée, celle qui présente le plus de ressources aux chercheurs, qui soit en France; sous ce rapport, plus encore peut-être que par ses travaux proprement dits, E. Bichat a rendu à la Science des services que nous ne saurions oublier, sa perte sera vivement ressentie par tous les membres de notre Société, à laquelle il appartenait depuis sa fondation.

Sur un terme complémentaire de la pression intérieure dans la formule de Van der Waals; par M. H. Moulin. — M. Moulin a cherché à accroître l'exactitude de la formule de Van der Waals en modifiant le terme dit *pression intérieure* $\frac{a}{v^2}$.

M. Amagat a montré qu'en adoptant pour ce terme une forme déduite des principes de la Thermodynamique et en en calculant les valeurs au moyen des résultats numériques qu'il avait donnés pour un certain nombre de gaz on arrivait à cette conclusion que : La pression intérieure quand le

volume diminue, croît d'abord, passe par un maximum, puis diminue; il est même arrivé, partant de là, à une forme de la relation $f(pvt) = 0$, qui représente bien les résultats expérimentaux, mais malheureusement est assez compliquée.

M. Moulin arrive à une forme plus simple en modifiant simplement le terme $\frac{a}{v^2}$ par l'adjonction d'un second terme qu'il a été conduit à écrire sous la forme $-\frac{C(1+\alpha t)}{(v-b)^2}$.

La formule qu'il adopte est donc la suivante :

$$p + \frac{A}{v^2} - \frac{C(1+\alpha t)}{(v-b)^2} = \frac{B(1+\alpha t)}{(v-b)}.$$

En déterminant la valeur de C, même sans modifier la valeur numérique des coefficients A et B de la formule de Van der Waals, on arrive déjà à améliorer sensiblement celle-ci; en effet, si après cette détermination on calcule au moyen de la formule ainsi modifiée des séries de valeurs de b pour diverses pressions et pour diverses températures, on trouve pour ce terme, même en le considérant pour le moment comme constant ainsi que cela a lieu dans la formule de Van der Waals, des écarts notablement moindres que ceux auxquels conduit la formule non modifiée.

A plus forte raison, en reprenant la détermination d'ensemble des trois coefficients A, B, C doit-on arriver à des résultats encore plus satisfaisants.

La formule modifiée présente du reste, dans tous les cas, cet avantage que : la forme adoptée pour la pression intérieure n'est point en contradiction avec la loi de ses variations énoncée plus haut et qui, évidemment, ne saurait être représentée par le terme $\frac{a}{v^2}$.

L'auteur fera connaître ultérieurement les résultats de ses calculs qui ne sont pas encore entièrement terminés.

Sur la biréfringence magnétique des liquides hétérogènes. — M. Cotton résume les expériences qu'il a faites, en collaboration avec M. Mouton, sur la biréfringence magnétique de certains liquides. On a cherché depuis longtemps si un liquide traversé par un faisceau de lumière normal aux lignes de force d'un champ magnétique, ne devient pas biréfringent, et ne prend pas les propriétés d'une lame cristalline uniaxe positive ou négative. Ces recherches ont été infructueuses jusqu'à ce que Majorana ait trouvé, en 1902, la propriété cherchée dans des solutions colloïdales d'hydroxyde ferrique. Chose curieuse, diverses solutions de ce corps donnent des résultats très différents; le signe même de la biréfringence n'est pas constant et sa grandeur varie beaucoup d'un échantillon à un autre. Un corps particulièrement actif est un produit pharmaceutique (*Fer Bravais*) pourvu qu'il soit préparé depuis très longtemps. Une petite cuve de 1^{mm} d'épaisseur remplie de ce corps suffit pour répéter l'expérience de Majorana; elle est placée dans un électro-aimant et traversée par un faisceau lumineux normal au champ. De part et d'autre sont deux nicols, dont les sections principales, croisées, sont à 45° des lignes de force. Lorsqu'on établit le courant, la lumière réapparaît colorée de teintes variées qui dépendent de l'intensité du champ (Expérience).

I. MM. Cotton et Mouton ont profité de la valeur élevée de la biréfringence obtenue avec ce liquide particulier pour étudier *séparément* les deux indices, ordinaire et extraordinaire, de la substance devenue ainsi biré-

fringente, à l'aide d'un petit prisme creux placé dans le champ. Ils ont trouvé que l'indice ordinaire n_o et l'indice extraordinaire n_e diffèrent tous deux de l'indice primitif n, et qu'on a sensiblement $n_e - n = 2(n - n_o)$. Cette propriété distingue la biréfringence dont il s'agit de la biréfringence électrique de Kerr et de celle aussi que prend un solide isotrope comprimé. Il en résulte, suivant une remarque due à M. Fortin, qu'un rayon de lumière se propageant *suivant les lignes de force* doit avoir, lui aussi, une vitesse différente quand le champ est excité.

II. L'appareil avec lequel MM. Cotton et Mouton ont le plus souvent étudié la biréfringence magnétique est présenté à la Société : Il est fondé sur la méthode de Chauvin (quart d'onde et analyseur à pénombre). La source de lumière est un arc au mercure.

Avec cet appareil ils ont obtenu les résultats suivants : 1° *Solutions colloïdales d'hydroxyde de fer préparées artificiellement* : On peut, suivant le mode de préparation, obtenir à volonté soit des liquides *positifs*, soit des liquides *négatifs*. On peut, dans certains cas, augmenter énormément la biréfringence par un chauffage de quelques heures à l'étuve à 100°; c'est ainsi que l'on peut obtenir des liquides positifs très actifs dont la biréfringence croît très régulièrement, à peu près comme le carré du champ. — 2° *Fer Bredig*. En employant, dans certaines conditions, le procédé de Bredig avec des électrodes de fer, on peut obtenir un liquide jaune clair qui garde pendant des mois, conservé à l'abri de l'air, son aspect colloïdal typique. Cette solution, probablement formée d'oxyde magnétique, donne une biréfringence positive dont la loi de variation avec le champ est toute différente de celle des solutions précédentes d'hydroxyde. La courbe représentant la biréfringence en fonction du champ s'élève d'abord très rapidement au voisinage de l'origine pour se transformer, à partir d'un champ de 3000 unités environ, en une droite légèrement ascendante. On peut, par suite, avec ce liquide (comme avec les plus actives des solutions d'hydroxyde), obtenir un phénomène mesurable avec les champs faibles produits par des bobines sans fer ou par des aimants permanents. Le dernier cas est réalisé dans une expérience disposée à la séance : en approchant un aimant en fer à cheval de la cuve renfermant le liquide, on voit nettement l'aspect des plages se modifier.

III. Schmauss a fait la remarque importante que les liquides présentant la biréfringence magnétique étaient des colloïdes et les faits qu'il a observés (en ajoutant de la gélatine à ces liquides ou en les faisant dessécher dans le champ) l'ont conduit à admettre que les particules en suspension dans le liquide hétérogène doivent *s'orienter*.

MM. Cotton et Mouton ont été conduits à se rallier à cette hypothèse et à compléter l'explication. Les faits qu'ils ont observés en filtrant les liquides actifs sur collodion par le procédé de M. Malfitano (la biréfringence est concentrée dans le résidu); en observant l'action de la pesanteur (le fond d'un flacon laissé longtemps au repos est beaucoup plus actif que la partie supérieure); en faisant coaguler le liquide dans le champ magnétique (le liquide reste actif); sont autant de preuves directes que le phénomène est lié à la présence des granules en suspension dans le liquide.

L'examen ultra-microscopique des divers liquides a été fait; il a montré en particulier que, si l'on augmente par un chauffage la grandeur de la biréfringence, les grains grossissent très nettement. On a pu faire cet examen ultra-microscopique sur des liquides pendant qu'ils étaient placés dans un champ magnétique (13000 environ) : les particules ne s'alignent pas pour former des files, comme le pensait Braun, et les mouvements browniens persistent : Ce sont donc sans doute ces mouvements, qui ont plus d'importance pour les particules très petites, qui viennent contrarier

l'orientation que tend à produire le couple magnétique (proportionnel, quand il n'y a pas saturation, au carré du champ).

On peut certainement admettre qu'un milieu hétérogène, renfermant des particules orientées toutes de la même façon, doit être biréfringent: mais, pour expliquer plus complètement le phénomène de Majorana, il faut d'abord montrer comment cette biréfringence est liée à l'action que chaque particule exerce, pour son propre compte, sur la lumière qui vient l'atteindre.

MM. Cotton et Mouton indiqueront ailleurs comment on peut, dans cette voie, retrouver théoriquement les faits expérimentaux, par exemple la règle relative aux indices. Il faut en outre rendre compte de l'existence des liquides négatifs; l'explication qui rend le mieux compte de leurs propriétés consiste à admettre que dans ce cas les particules en suspension sont anisotropes; elles se comportent en effet dans le champ comme le feraient de petits cristaux imprégnés de substances magnétiques étrangères en proportion variable.

IV. Cette hypothèse a conduit MM. Cotton et Mouton à examiner des liquides ne renfermant plus de métaux magnétiques, mais tenant en suspension de très petits cristaux en voie de formation. En mêlant par exemple des solutions convenablement diluées de carbonate de sodium et d'azotate de calcium, on obtient un liquide où le carbonate de calcium ne se dépose que lentement. Ce liquide présente d'abord le phénomène signalé par M. Majorana et par M. Meslin du dichroïsme magnétique, mais en outre il possède la biréfringence magnétique elle-même, qui semble devoir être une propriété générale des liquides renfermant en suspension de très petits cristaux de grosseur convenable.

Compte rendu de la réunion tenue à Oxford pour la coopération dans les recherches sur le Soleil. — M. Perot rend compte de la réunion de l'Union internationale pour l'étude du Soleil qui s'est tenue à Oxford, le 27 septembre dernier, et dans laquelle M. Fabry et lui étaient chargés de représenter la Société de Physique. L'Institut de France était représenté par M. Janssen et la Société astronomique de France, par MM. Deslandres et de la Baume-Pluvinel.

Les pays représentés étaient : l'Allemagne, l'Angleterre, l'Espagne, les États-Unis, la France, les Pays-Bas, la Russie et la Suède.

Parmi les 37 délégués présents, se trouvait M. Weiss, représentant l'Union internationale des Académies.

Les séances ont duré trois jours, et l'Union a voté plusieurs résolutions dont M. Perot communique le texte; ce sont :

1° *Relativement aux études sur le Soleil.*

« 1. La coopération des observateurs est souhaitable dans les diverses recherches relatives au Soleil, telles que les observations visuelles et photographiques de la surface, les observations visuelles des protubérances et les observations de l'atmosphère solaire faites à l'aide des spectrohéliographes de types divers.

» 2. Lorsqu'une institution aura déjà réuni et coordonné des résultats d'études faites par divers observateurs, les membres de l'Union seront invités à mettre leurs observations à la disposition de cette institution.

» 3. Relativement aux recherches dont les résultats ne sont pas encore réunis et coordonnés, l'Union nommera un Comité spécial chargé de préparer et d'organiser les recherches. Ce Comité devra communiquer son plan et ses propositions au Comité exécutif qui organisera un système d'observations en conformité du plan transmis.

» 4. Une semblable coopération peut être organisée dès maintenant dans deux branches de recherches:

» 1° L'étude du spectre des taches;

» 2° L'étude avec enregistrement des phénomènes de l'atmosphère solaire par l'observation des radiations.

» 5. L'Union insiste sur ce fait que, si la coopération présente une utilité évidente pour certaines recherches, l'initiative individuelle reste dans un grand nombre d'autres cas le facteur principal. Il est autant du devoir de l'Union d'encourager les recherches originales que de provoquer la coopération.

2° *Relativement aux longueurs d'onde.*

» 1. La longueur d'onde d'une radiation convenablement choisie sera prise comme étalon primaire des longueurs d'onde. Le nombre qui représente cette longueur d'onde sera fixé une fois pour toutes; il définira dès lors l'unité de longueur d'onde qui devra différer aussi peu que possible de 10^{-10} mètre et s'appellera Angström.

» 2. Il y a lieu de désigner:

» Des étalons secondaires dont la distance ne dépassera pas 50 unités d'Angström. Ces étalons secondaires seront rapportés à l'étalon primaire par une méthode interférentielle. La source lumineuse sera fournie par un arc électrique de 6 à 10 ampères.

» 3. Un comité sera nommé pour choisir les étalons et organiser les déterminations de ces longueurs d'onde relativement à l'étalon primaire au moins dans deux laboratoires indépendants.

» 4. Le même Comité sera chargé de choisir des étalons tertiaires placés à des distances variant de 5 à 10 unités d'Angström. Les longueurs d'onde de ces étalons tertiaires seront obtenues par interpolation avec des réseaux.

3° *Relativement aux études sur la radiation solaire.*

» 1. Pour assurer l'uniformité des observations il est à désirer que les observations de l'intensité de la radiation solaire soient faites dans les différentes localités autant que possible avec le même type d'instrument.

» 2. Actuellement, le pyrhéliomètre d'Angström sera adopté comme instrument étalon.

» 3. Il est à désirer que des comparaisons précises soient faites entre l'intrument d'Angström et les autres instruments étalons, et que MM. Abbot, E.-W. Nilson, le professeur Callendar et le professeur Wladimir Michelson soient priés d'assister l'Union pour ce travail.

» 4. Pour déterminer les changements possibles dans l'intensité de la radiation solaire, il est désirable d'assurer l'exécution des mesures de l'intensité dans des régions du spectre déterminées où les effets dus à l'ozone, à la vapeur d'eau et à l'acide carbonique ne se font pas sentir.

» 5. Il y a lieu de nommer un Comité chargé de rédiger un plan de coopération et de faire des propositions pour la rédaction des observations. Ce Comité est prié de communiquer le plan et les propositions au Comité exécutif pour l'organisation du système des observations suivant le plan tracé.

» 6. La réunion reconnaît la grande importance des mesures faites par la photographie directe, aussi bien que par d'autres méthodes, pour étudier comparativement l'intensité de la radiation émise par les différentes parties de la surface du Soleil et souhaite comprendre de semblables mesures dans les sujets rentrant dans la sphère d'action de l'Union. »

En outre, quatre Comités pour les recherches solaires, l'étude des taches,

la détermination des longueurs d'onde et l'étude de la radiation solaire, ont été nommés.

M. Perot indique que cette réunion a été un succès pour les méthodes françaises, dont plusieurs ont été indiquées comme devant servir aux déterminations ; en particulier la détermination nouvelle des longueurs d'onde doit être faite dans trois Laboratoires indépendants, dont le Laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers.

Recherches sur la gravitation, par V. Crémieu. — L'auteur est parti de l'incompatibilité établie entre le « mécanisme » et le principe de Carnot.

Il établit un parallèle entre les idées qu'Archimède, avec l'état de la Science à son époque, pouvait se faire de la cause de la poussée des liquides et, d'autre part, l'idée que nous pouvons, avec nos connaissances, nous faire de la gravitation, en supposant que le principe de la dégradation de l'énergie s'applique à l'énergie gravifique.

De ces idées, on peut déduire deux ordres d'expériences :

Dans les premières, on recherche si la loi de Lenz s'applique à la gravitation. L'auteur a essayé, dans ce sens, une première série d'expériences dont les résultats ont été négatifs.

Dans le second ordre d'expériences, on pourra rechercher si, en passant d'un milieu pondérable à un autre, l'énergie gravifique libre a subi des variations du même ordre que celles subies par l'énergie calorifique, par exemple.

L'auteur a entrepris à ce sujet deux séries d'expériences. Les premières mettent en évidence l'existence d'attractions particulières agissant entre gouttes liquides immergées au sein d'une même masse d'un second liquide non miscibles et de densité identique à celle des gouttes.

Le commencement de preuve résultant de ces expériences a amené l'auteur à entreprendre la mesure de la constante de gravitation entre solides immergés au sein d'une même masse liquide.

Ces expériences, très délicates, ont donné, après quatre ans de travail, une série de résultats d'où l'auteur conclut :

1° Qu'il est possible de répéter l'expérience de Cavendish au sein des liquides, avec une netteté plus grande que dans l'air ;

2° Que les premiers nombres obtenus montrent qu'on peut espérer trouver, dans ces expériences, une confirmation des hypothèses qui les ont inspirées.

SÉANCE DU 1er DÉCEMBRE 1905.

Présidence de M. E.-H. Amagat.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 17 novembre est lu et adopté.

Les personnes qui ont été présentées dans la dernière séance sont élues Membres de la Société.

Les personnes dont les noms suivent sont présentées pour être Membres de la Société. Il sera statué sur leur admission dans la séance du 15 décembre prochain.

MM. Besson (Louis), Sous-Chef à l'Observatoire de Montsouris.
Cooper (W.-R.), « Honorary Secretary », Physical Society of London, Member de « Institution of Electrical Engineers », 82, Victoria St., Westminster, Londres (Angleterre).
Dunoyer, Agrégé, Préparateur de Physique au Collège de France.
Ewers (Paul), Dr Phil. Privat-dozent f. Physik, Technische Hochschule, Physikalische Institut, München (Allemagne).
Le Cadet (Georges), Astronome adjoint à l'Observatoire de Lyon, à Saint-Genis-Laval.
Mac Lennan, Professeur à l'Université de Toronto, prov. d'Ontario (Canada).
Moulin, Attaché au laboratoire de Physique du Collège de France, à Paris.
La Bibliothèque de l'Université de Besançon.
Le Laboratoire de Physique de l'Université de Genève (Suisse).

Sur une nouvelle machine frigorifique; par M. Maurice Leblanc. — Cette machine est destinée à refroidir un courant d'eau naturelle ou salée.

Le froid y est produit par l'évaporation partielle dans le vide de l'eau à refroidir, comme dans la machine Carré. Mais alors que, dans cette dernière, la vapeur d'eau produite par l'évaporation est absorbée par de l'acide sulfurique concentré, l'auteur s'est proposé d'extraire la vapeur, au fur et à mesure de sa production, par des moyens purement physiques. L'énormité des volumes à extraire due à l'extrême faiblesse de la densité de la vapeur d'eau, aux températures inférieures à 0°, prohibait l'emploi de pompes, qui auraient dû avoir un volume démesuré, par rapport à leur puissance, et un rendement illusoire. Il s'est servi d'éjecteurs à vapeur, où la vitesse du fluide entraîné atteint environ 1000^{m} par seconde, ce qui leur permet d'en extraire de très grands volumes, sans que leurs dimensions soient exagérées.

Les calories prises au courant d'eau sont transportées sur un corps à température aussi basse que possible. Ce corps est, comme dans toutes les machines du même genre, un condenseur refroidi par un autre courant d'eau.

La nouvelle machine se compose, en définitive, d'une chambre hermétiquement close, dans laquelle le vide est entretenu par un éjecteur à vapeur qui aspire dans cette chambre et refoule dans un condenseur.

L'eau à refroidir est introduite à la partie supérieure de cette chambre, où elle pénètre naturellement, sous l'influence du vide. Elle s'y évapore partiellement. La partie non évaporée, mais refroidie, est reprise à la partie inférieure par une pompe qui la renvoie dans l'atmosphère.

L'étude de cette machine a conduit l'auteur à faire une théorie du fonctionnement des éjecteurs à vapeur. La principale cause de mauvais rendement de ces appareils est due à la perte de force vive occasionnée par la rencontre des veines fluides entraînante et entraînée, qui ont des vitesses très différentes. Dans le cas actuel, le poids du fluide entraîné étant toujours plus petit que celui du fluide entraînant, le rendement de l'éjecteur peut être comparable à celui du système constitué par une machine à vapeur et par un compresseur à piston, tant que la compression peut s'y opérer dans de bonnes conditions. Pour cela, il faut qu'elle soit effectuée le long d'un diffuseur divergent, toutes les fois que la pression initiale est au moins égale à 58 pour 100 de la pression finale. Lorsque la pression initiale est plus petite, il faut que le diffuseur soit d'abord convergent puis divergent. Jusqu'à présent, on n'avait pu se servir de diffuseur convergent-divergent, la compression produite dans la partie convergente étant détruite par une détente consécutive dans la partie divergente. L'auteur n'est parvenu que tout récemment à empêcher la production de ce phénomène et à rendre possible l'utilisation de ces diffuseurs.

En se servant de diffuseurs divergents, il a pu obtenir dans des conditions de rendement très supérieures à celles des machines à ammoniaque

des différences de température de 10° et, dans des conditions de rendement comparables, des différences de température de 20°, ce qui a permis de fabriquer de la glace. Il s'occupe de la production de différences de températures supérieures, à l'aide de ses nouveaux diffuseurs, et est parvenu, dès à présent, à obtenir de l'eau salée à —14°, le condenseur étant à la température de +23°.

Pouvoirs émissifs et absorbants; par M. Le Bel. — M. Le Bel expose la suite de ses expériences destinées à démontrer qu'il peut exister une inégalité entre le pouvoir émissif d'un corps et son pouvoir absorbant relativement au rayonnement émis par une enceinte de nature différente. Un couple thermo-électrique différentiel a été formé avec un fil de platine iridié en forme de U soudé à deux fils de platine protégés par un crayon en terre réfractaire. Sur l'une des pointes de la fourche ainsi constituée on place un chapeau formé par un petit tube de platine très mince sur lequel on a enroulé du fil de platine de $0^{mm},03$, le tout pesant jusqu'à $0^{g},2$. L'enceinte est constituée par un tube fermé en platine fondu de 10^{mm} de diamètre et 140^{mm} de longueur placé dans un tube de cuivre rouge, lequel est chauffé soit au moyen d'un bain de plomb, soit par le courant électrique.

En déplaçant le chapeau d'un point à l'autre on observe avec l'un et l'autre appareil une déviation du galvanomètre qui commence vers 50° pour atteindre entre 350° et 400° un maximum de 7^{mm} à 10^{mm} suivant le chapeau employé, ce qui correspond à 0°,10 ou 0°,13. Le phénomène diminue ensuite de $\frac{1}{3}$ environ jusqu'à 500° mais tend vers une constante; on n'a atteint 800° qu'au bain de plomb. Il diminue encore quand on calcine le chapeau, mais on peut alors chauffer pendant 36 heures à 600° sans qu'il faiblisse.

Les observations faites avec une enceinte plus grande de 40^{mm} de diamètre (mais avec une gaine de cuivre trop courte) ont confirmé ces résultats; on a pu introduire dans cet appareil un chapeau de 1^{g} et constater que la différence observée est plus forte.

On corrigeait l'inégalité de température en retournant le crayon de 180°, et, si l'équilibre est bien réglé, on observe la même différence moyenne, que la fourche soit verticale ou horizontale.

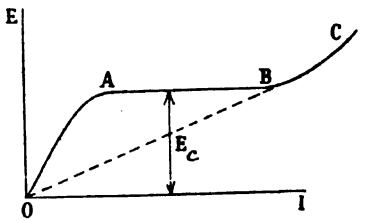
Le phénomène diminue quand on prend pour enceinte un tube en argent et quand on fait le chapeau en fil d'or ou en fil d'argent; il se maintient avec du fil de palladium. Si, au contraire, on met une lame de mica à l'intérieur ou à l'extérieur du chapeau, on n'observe plus rien; on n'a pas non plus réussi à observer une différence lorsque le tube formant enceinte était en platine aggloméré, c'est-à-dire pareil au fil mince du chapeau. Du reste, le platine fondu diffère aussi du platine aggloméré par sa dureté et sa malléabilité moindre; il est probablement moins pur que le métal fourni directement par la calcination du chloroplatinate ammonique.

L'auteur a aussi constaté que le bloc de granit entouré d'asbeste continue depuis un an et quart à manifester un excédent de 0°,03 à 0°,04 sur la température de la cave à 20^{m} de profondeur où il se trouve, et ces deux sortes d'observations tendent à confirmer son hypothèse initiale. On peut sans doute admettre que le granit participe des propriétés du radium; mais la singulière facilité qu'on éprouve à supprimer le phénomène observé avec le fil de platine mince, soit en modifiant l'enceinte, soit en couvrant le chapeau de mica, ainsi que la faiblesse du phénomène à la température habituelle et son maximum vers 400, ne paraissent pas établir d'analogie avec les effets de radioactivité qui sont invariables et indépendants des actions extérieures.

L'Auteur se réserve de poursuivre la partie physique de cette recherche.

Note sur les propriétés des contacts imparfaits. Travaux de M. Fisch, M. Schneider, M. Blanc; par M. Pierre Weiss. — Le travail de M. Fisch

est uniquement de nature expérimentale et descriptive. Au moment où il a été entrepris plusieurs physiciens, MM. Guthe et Trowbridge, M. Ph.-E. Robinson, avaient déjà substitué dans des recherches analogues à l'excitation du cohéreur par les ondes, difficile à obtenir identique à elle-même et à mesurer, l'excitation du cohéreur par un courant continu traversant le contact. L'analogie profonde, sinon l'identité de ces deux modes d'excitation, n'est pas douteuse. Le résultat saillant de ces recherches était, dans la *caractéristique,* c'est-à-dire dans la courbe représentant pour cet appareil la force électromotrice en fonction de l'intensité du courant, l'existence d'une portion horizontale étendue AB. Le long de AB la résistance du contact, donnée par le coefficient angulaire de la droite qui va d'un point



de la courbe à l'origine, décroît régulièrement. AB est en quelque sorte l'image graphique de la cohération. Guthe et Trowbridge ont donné à la force électromotrice correspondant à AB le nom de *tension critique* (E_c).

On pouvait se demander si cette tension critique était une constante naturelle et quelle était sa grandeur dans diverses circonstances.

Après avoir constaté, par de nombreuses expériences, que le courant alternatif et le courant continu agissent de la même facon, avec une plus grande sensibilité au courant alternatif que la différence entre la force électromotrice maxima et la force électromotrice efficace ne suffisent pas à expliquer, M. Fisch s'occupe de cette tension critique.

Il montre que la région AB est très inégalement développée suivant les conditions de l'expérience. Tandis que dans certaines séries d'expériences se rapportant à des surfaces de fer plongées dans l'air la tension oscille dans le voisinage immédiat de 0,21 volt, l'intensité du courant variait de 6 à 300 milliampères, c'est-à-dire dans le rapport de 1 à 50, lorsque ces mêmes surfaces sont plongées dans d'autres milieux : l'alcool, l'huile de paraffine, la glycérine, le phénomène perd de sa netteté et ce n'est plus que par à peu près que l'on peut déduire des courbes la valeur numérique d'une tension jouant le rôle de tension critique. Dans tous les cas la courbe, après la portion AB, se continue par une portion ascendante BC.

M. Fisch indique pour la tension critique d'un cohéreur de fer dans

L'air	0,22
Le pétrole	0,22
La térébenthine	0,21
L'alcool	0,205
L'eau	0,20
L'huile de paraffine	0,29
La glycérine	0,78

Cette tension critique semble donc dépendre surtout du solide et beaucoup moins du milieu interposé. Cela résulte des cinq premiers nombres. Les deux derniers nombres montrent que certains cas particuliers, peut-être

ceux des milieux très visqueux, font exception. Les mesures de M. Fisch, qui donnent une image fidèle des propriétés expérimentales du cohéreur, laissent donc en définitive l'impression que cette tension critique est une résultante complexe de plusieurs facteurs et ne font pas avancer la connaissance de la nature intime du phénomène.

M. Schneider, au cours d'une étude expérimentale sur la même question, a remarqué la forte adhésion entre les deux solides en contact, après la cohération. Il a cru trouver dans cette circonstance un moyen d'analyse du phénomène et a été conduit à faire l'hypothèse qui consiste à admettre la soudure par fusion des arêtes vives ou angles proéminents par lesquels les corps se touchent. Son travail consiste donc à rechercher jusqu'à quel point cette hypothèse est conforme aux faits.

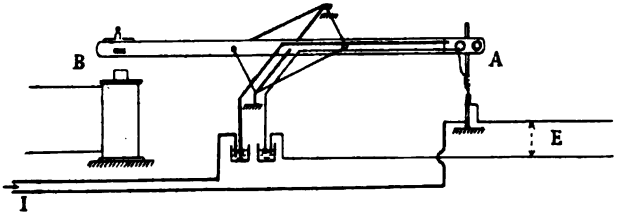
La forme de la courbe représentant la relation entre E et I s'explique aisément dans cette hypothèse. E tend à croître par suite de la loi d'Ohm, mais en même temps E décroît au fur et à mesure de l'augmentation de la surface de contact par la fusion des aspérités. M. Schneider retrouve dans ses expériences le palier horizontal ayant donné lieu à la notion de tension critique. Pour le fer, par exemple, ce palier se poursuit dans certains cas jusqu'à une intensité de plusieurs ampères. Cette tension critique résulte donc de la compensation mutuelle des diverses causes de variation de la force électromotrice, elle n'est pas une constante naturelle. Ce phénomène n'est pas sans analogie partielle avec celui de l'arc électrique, dans lequel, par suite de l'agrandissement du cratère aux fortes intensités, la résistance diminue en même temps que l'intensité augmente. M. Schneider montre ce caractère accidentel de la tension critique en constatant que, dans ses nombreuses expériences, le fer et l'aluminium seuls donnent une portion de courbe bien horizontale. Il trouve pour le platine, l'or, l'argent, l'étain, le zinc, le plomb et le nickel des courbes dans lesquelles il y a encore une région sensiblement rectiligne, mais ascendante. Au contraire, pour un contact de deux surfaces de magnétite, il trouve une portion de courbe rectiligne descendante.

Un accroissement de pression initiale a pour effet d'augmenter l'étendue du contact. Il faudra donc une intensité plus grande pour amener la soudure, et la variation de résistance qui lui est attribuée.

Si le contact est réalisé au moyen de barreaux se touchant bout à bout, plus le diamètre des barreaux sera fort plus il y aura de chaleur enlevée par conductibilité. La variation de résistance se produira donc pour un courant plus faible avec des barreaux minces qu'avec des barreaux de fort calibre.

Ces deux conséquences sont vérifiées par l'expérience.

La figure ci-jointe représente le cohéreur-balance de M. Schneider qui



sert à mesurer l'adhérence entre les deux corps en contact. Un fléau très léger porte à l'une de ses extrémités A un barreau vertical du corps à étudier, reposant par son extrémité sur l'extrémité d'un barreau identique. A l'autre bout du fléau B se trouve une petite pièce de fer attirée par un électro-aimant.

L'attraction de cet électro-aimant était au préalable étalonnée au milligramme près en fonction du courant qui y passe.

Les mesures ont montré que, dans l'intervalle qui correspond aux variations de résistance indiquées par la caractéristique, l'adhésion est sensiblement proportionnelle à l'inverse de la résistance, c'est-à-dire à la conductibilité du contact. M. Schneider trouve, par exemple, pour un contact platine-platine :

Courant.	P. Adhésion.	R. Résistance.	P × R.
ampères	grammes	ohms	
8,2	3,50	0,0146	0,0511
7,0	2,72	0,0195	531
6,0	2,26	0,0244	551
5,0	1,64	0,0309	508
4,0	1,42	0,0394	558
3,0	0,95	0,0514	490

Le fer a donné des résultats analogues.

Si la fusion est cause de la variation de résistance, celle-ci doit se produire plus facilement quand on porte le contact à une température élevée au moyen d'une source de chaleur extérieure. L'expérience a été faite en entourant le contact d'un four électrique de petites dimensions et elle a vérifié les prévisions.

L'élévation de température a pu être constatée directement en formant le contact de deux métaux différents et en mesurant leur force électromotrice thermo-électrique. On a trouvé ainsi :

Courant dans le contact.		Une température supérieure à
ampères		°
2,3	fer-argent	1000
3,6	fer-cuivre	1000
4	platine-platine rhodié	1500

Cette élévation de température est très fugitive, elle disparaît d'autant plus vite pour un même contact qu'elle est obtenue avec un courant plus faible. M. Schneider attribue à cette circonstance la difficulté que l'on rencontre à construire un galvanomètre à indications assez rapides pour la mettre en évidence à de plus faibles intensités.

M. Schneider s'est préoccupé de rechercher la continuité des effets observés en partie avec des courants intenses avec ceux qui se produisent dans le cohéreur proprement dit.

Avec un oscillateur de Lodge, placé à 5^{m} de distance, dont il faisait varier le fonctionnement, il obtint des variations de résistance tout à fait analogues à celles qu'il avait provoquées par le passage direct du courant.

Il put aussi, au moyen de ces oscillations, provoquer des adhérences entre les métaux en contact, variant de 0^{g},02 à 0^{g},75.

M. Schneider avait cru pouvoir généraliser et attribuer les phénomènes du cohéreur proprement dit à la même cause. L'extrapolation était un peu hardie. Les quantités d'énergie mises en œuvre dans ses expériences sont incomparablement plus grandes que celles qui agissent dans la télégraphie sans fils. On peut se demander s'il n'aurait pas imité, par une étude de laboratoire, la soudure électrique des rails plutôt que le cohéreur. Mais la résistance au point de contact de deux arêtes vives est extrêmement grande, où, si l'on veut, alors même qu'il n'y passe qu'un courant très

faible, la densité du courant est énorme dans le voisinage de l'arête. Dans le cas des courants induits par des oscillations hertziennes, la conductibilité thermique n'a pas le temps d'intervenir pour enlever la chaleur de Joule. On doit donc admettre que de petites quantités de matières atteignent fréquemment des températures élevées. L'explication de M. Schneider conserve donc une certaine vraisemblance.

La très belle Étude sur le cohéreur que M. Blanc a présentée à la Société de Physique, dans la séance du 5 mai 1905, nous a appris depuis qu'il existe au début de la cohération un phénomène caractéristique différent de la soudure, qui est la diffusion des couches de passage des corps en contact. M. Blanc a appuyé sa manière de voir sur des expériences très concluantes et l'a reliée à d'autres faits déjà connus, en apparence étrangers, au moyen d'une théorie fondée sur la théorie électronique de la conduction métallique.

L'on pourrait, il est vrai, établir sans peine une échelle continue de phénomènes intermédiaires entre la diffusion, telle que la conçoit M. Blanc, et la soudure. Mais cette continuité serait illusoire; M. Blanc a montré que l'élévation de température n'est pas nécessaire à la cohération.

La soudure doit-elle néanmoins conserver une certaine place dans l'explication des phénomènes dont les cohéreurs pratiquement employés sont le siège? Cela n'est pas impossible. Remarquons que dans les expériences de M. Blanc toutes les arêtes vives sur lesquelles peut se localiser une quantité de chaleur instantanément dégagée sont évitées, tandis que, dans la pratique, on a trouvé avantageux d'utiliser des fragments métalliques à arêtes aussi vives que possible.

En revendiquant pour M. Schneider la part de vérité qui peut être contenue dans son explication, je ne crois pas diminuer le mérite de M. Blanc. Tandis que M. Schneider s'est contenté de tirer tout le parti possible de ce phénomène bien connu de la soudure électrique, M. Blanc a enrichi la Physique moléculaire de données nouvelles.

SÉANCE DU 15 DÉCEMBRE 1905.

PRÉSIDENCE DE M. E.-H. AMAGAT.

La séance est ouverte à 8 heures et demie.

Le procès-verbal de la séance du 1er décembre est lu et adopté.

Les personnes qui ont été présentées dans la dernière séance sont élues Membres de la Société.

Les personnes dont les noms suivent sont présentées pour être Membres de la Société. Il sera statué sur leur admission dans la séance du 5 janvier prochain.

MM. ANASTASSIADÈS (A.), Docteur, Professeur à l'École évangélique, à Smyrne (Turquie).

BING, Docteur en Médecine, à Paris.

CATHIARD (André-Georges-Marcel), Élève à l'École supérieure d'Électricité, à Paris.

MM. Jardin, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Marseille.
Nicollier (Marius), Docteur ès Sciences, Professeur à Montreux (Suisse).
Passa, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Marseille.
Pichon, Professeur de Physique au Collège de Perpignan.
Pilleux (André), Capitaine d'Artillerie détaché à la fabrique d'armes de Puteaux.
Salet (P.), Attaché à l'Observatoire de Paris.
Trabarel, Professeur de Physique au Collège de Perpignan.
Vouillemin, Capitaine d'Artillerie breveté, Officier d'ordonnance du Général commandant le 15e Corps d'armée, à Marseille.

MM. Gay, Girardet et Vieille sont élus Membres de la Commission chargée de vérifier les comptes de l'année.

M. le Président annonce la perte douloureuse que la Société vient de faire en la personne de M. *Radiguet*, Ingénieur-Constructeur, à Paris.

M. Pellat présente, au nom de M. *Yvon*, un travail fait par ce physicien sur le compte-gouttes normal. Dans ce travail M. Yvon a étudié avec un soin extrême toutes les causes qui peuvent influer sur la grosseur des gouttes. Il a trouvé que des conditions qui auraient pu paraître *a priori* n'avoir pas d'influence sur la grosseur des gouttes ont pourtant une influence très marquée; telles sont la pression du liquide et la rapidité de l'écoulement. L'importance pratique de ce travail extrêmement bien fait n'échappera à personne.

Sur la liquéfaction de l'air et ses applications; M. Georges Claude. — La liquéfaction de l'air est, comme on sait, basée sur la cumulation, à l'aide d'un échangeur de température, du froid produit par la détente de l'air comprimé. La mesure de ce froid est évidemment fournie par la quantité de travail effectuée par l'air pendant sa détente. M. G. Claude montre à ce propos la supériorité théorique considérable de la détente avec travail extérieur sur la détente sans travail extérieur employée exclusivement jusqu'ici. Il est parvenu à utiliser pratiquement le premier mode, en dépit de difficultés graves qui avaient découragé avant lui nombre d'expérimentateurs, grâce aux propriétés d'incongelabilité de l'éther de pétrole, qui permettent d'assurer le graissage de la machine de détente pendant la mise en marche, puis grâce à l'*autolubrification* réalisée en régime par l'air liquide même qui se forme dans la machine.

Mais M. G. Claude explique que la marche réalisée dans ces conditions est très défectueuse, l'air comprimé arrivant à la machine au voisinage immédiat de sa liquéfaction, ce qui réduit à peu de chose son travail d'expansion.

Il explique comment il lui a été possible de remédier à ce grave inconvénient en envoyant l'air détendu, à sa sortie de la machine, dans un *liquéfacteur*, c'est-à-dire autour d'un faisceau tubulaire alimenté par une partie de l'air comprimé et froid du circuit d'alimentation de la machine. L'air détendu provoque la liquéfaction de cet air comprimé, se réchauffe de ce fait jusque vers —140° et, pénétrant à cette température et non plus à — 190° dans l'échangeur, refroidit beaucoup moins l'air comprimé. De ce fait, le rendement en air liquide est triplé, et le rendement des meilleurs appareils basés sur la détente sans travail extérieur notablement dépassé.

Sur l'extraction de l'oxygène, M. Claude expose d'abord que celle-ci est basée sur l'évaporation de l'air liquide, qui donne au début surtout de l'azote, et à la fin de l'air suroxygéné. Mais ce procédé d'obtention serait anti-économique sans la récupération du froid de l'air liquide : on obtient celle-ci en provoquant l'évaporation de l'air liquide à l'aide d'air comprimé

à 3^{atm} ou 4^{atm} préalablement refroidi par sa circulation dans un échangeur en sens inverse des gaz vaporisés, dont il retient le froid.

L'air comprimé se liquéfie alors en cédant sa chaleur latente de liquéfaction au liquide extérieur, qui se vaporise de ce fait; la quantité d'air liquide ainsi reconstituée est sensiblement équivalente à celle évaporée et la quantité d'air liquide d'appoint à fournir par la machine à air liquide pour combler le déficit est très faible.

D'après ce mode opératoire, commun à tous les anciens procédés, l'air à traiter est totalement liquéfié, ce qui provient de la croyance, née des expériences de Dewar, que, lorsque l'air liquide se liquéfie, ses deux éléments constitutifs se condensent simultanément. M. G. Claude explique que cette croyance est fausse et qu'au contraire les premières parties de la liquéfaction sont particulièrement riches en oxygène. Grâce à son dispositif de *liquéfaction partielle* avec *retour en arrière*, il a pu mettre ce fait à profit en séparant l'air à traiter en un liquide riche, titrant jusqu'à 48 pour 100, et en un résidu gazeux qui est de l'*azote pur* dont la valeur industrielle est très grande. Il démontre ce fait par une expérience faite devant l'auditoire.

Les procédés basés sur la vaporisation fractionnée ne peuvent fournir que de l'air suroxygéné, mais il est possible d'arriver à l'oxygène pur, grâce aux procédés basés sur la rectification.

Dans le système Lévy par exemple, le liquide vaporisé par la liquéfaction corrélative d'air à 3^{atm} ou 4^{atm} est exclusivement de l'oxygène pur; une partie de cet oxygène est directement envoyée vers les appareils d'utilisation, le reste monte dans une colonne de rectification qui surmonte le vaporiseur et où s'écoule de plateau en plateau, au contact des gaz ascendants, l'air liquide à 21 pour 100 récupéré.

Cet air liquide condense progressivement l'oxygène des gaz ascendants et arrive au vaporiseur à l'état d'oxygène liquide pur, tandis que les gaz épuisés sortent à la teneur de 7 pour 100 d'oxygène. On ne recueille donc ici que $\frac{2}{3}$ de l'oxygène de l'air traité et l'on n'obtient pas d'azote pur. M. Claude montre comment la combinaison de son système de retour en arrière avec la rectification permet de supprimer cette dernière imperfection et d'arriver ainsi à la séparation intégrale de l'air en oxygène pur et azote pur.

Deux appareils basés sur ces principes fonctionnent à l'usine de la Société *L'Air liquide* à Boulogne-sur-Seine, l'un produisant 700^{m^3} et l'autre 1000^{m^3} d'oxygène pur par jour. M. G. Claude se fera un plaisir d'y convier les Membres de la Société de Physique ainsi que ceux de la Société des Ingénieurs civils dans le courant de janvier.

Sur le rendement en rayons X *du tube de Crookes suivant les conditions de son excitation;* par M. S. Turchini. — La connaissance de l'étincelle équivalente d'un tube de Crookes étant capitale, il était nécessaire, avant d'entreprendre l'étude de son rendement en rayons X, de savoir comment variait cette étincelle avec les constantes du circuit : *intensité du courant, bobine employée, fréquence de l'interrupteur.*

L'étincelle équivalente étant $4^{cm},5$ avec une intensité de $0^{mA},3$, était de $10^{cm},5$ avec 1^{mA}. L'étincelle équivalente augmente donc avec l'intensité, mais augmente plus vite qu'elle.

Pour une même intensité et une même fréquence de l'interrupteur, l'étincelle équivalente d'une bobine de 25^{cm} de longueur d'étincelle est plus grande que celle d'une bobine de 45^{cm}. Avec $I = 0^{mA},4$, l'étincelle équivalente avec la petite bobine a été de 12^{cm}, tandis que, avec la grosse bobine, elle n'était que de $7^{cm},5$.

L'étincelle équivalente varie également avec la fréquence des interruptions. Pour mesurer celle-ci, un disque stroboscopique, éclairé au moyen

d'une étincelle de haute fréquence, donnant 42 trains d'onde par seconde, était placé sur l'axe de l'interrupteur-turbine à mercure. La courbe montre que l'étincelle équivalente tend vers une limite quand la fréquence augmente à intensité constante. Elle était de 8cm pour 15 interruptions, et de 2cm,5 pour 126 interruptions par seconde.

Un autre fait découle de cette étude, c'est que la fréquence qui semble le mieux convenir au bon fonctionnement du tube de Crookes est celle de 30 interruptions par seconde environ; c'est la *fréquence optima*.

L'étude du rendement en rayons X a été faite d'abord en comparant l'éclat d'un écran excité par un tube de Crookes à un étalon lumineux, et ensuite en faisant des poses radiographiques sur une plaque photographique et mesurant la transparence des plaques impressionnées par la méthode de Camichel.

A intensité constante, l'éclat d'un écran ainsi excité augmente avec l'étincelle équivalente, jusqu'à une valeur de celle-ci comprise entre 10cm et 12cm; ensuite la courbe est pratiquement confondue avec une asymptote horizontale.

Avec une même intensité, l'éclat d'un écran est d'autant plus faible que la fréquence des interruptions est plus grande, fait dû sans doute à ce que, lorsque la fréquence augmente, l'étincelle maxima, que donne la bobine pour une intensité donnée, diminue et se rapproche trop de l'étincelle équivalente du tube.

En s'adressant à des bobines différentes, toutes choses égales d'ailleurs, le rendement en rayons X est toujours plus grand pour une bobine de petites dimensions, que pour une forte bobine. Cela ne veut pas dire que les petites bobines doivent être préférées, car avec elles il est difficile d'obtenir de gros débits; si l'on veut y arriver, le tube fonctionne mal, parce que les interruptions deviennent mauvaises à cause de la forte intensité du primaire; en outre, il durcit très rapidement, ce qui se produit beaucoup moins avec une forte bobine.

La self-induction de la bobine a également une influence sur le rendement du tube. Cette étude, faite avec une bobine à self variable, a montré que l'éclat de l'écran est plus intense, toutes choses égales, quand la bobine fonctionne avec toute sa self que lorsqu'on la réduit.

Les expériences précédentes, reprises en faisant des poses radiographiques, ont donné des résultats identiques.

OUVRAGES REÇUS PAR LA SOCIÉTÉ

PENDANT L'ANNÉE 1905.

American Journal of Science. — 4e série, T. XVIII et XIX, 1905; in-8°.

American Journal of Mathematics. — Edited by Frank Morley, with the cooperation of Simon Newcomb, A. Cohen, Charlotte A. Scott and the other mathematicians. — Published under the auspices of the Johns Hopkins University. Vol. XXXVII, nos 2 et 3; in-4°.

Annales de la Société scientifique de Bruxelles. — 29e année, fasc. 1 à 4, 1904-1905; in-8°.

Annalen der Physik. — Band XVI, XVII et XVIII, 1905; 3 vol. in-8°.

Annales de Chimie et de Physique. — 8e série, t. IV, V et VI, 1905; 3 vol. in-8°.

Annales de la Faculté des Sciences de Marseille, t. XIV, année 1904. 1 vol. in-4°.

Annales scientifiques de l'Université de Jassy. — T. IV, 1905; in-8°.

Année photographique 1904 (L'), par L.-P. Clerc. — Publiée par Ch. Mendel, 6e année, 1905; in-8°.

Annuaire pour l'an 1905 avec des Notices scientifiques. — Publié par le Bureau des Longitudes. — Paris, Gauthier-Villars; in-16.

Archives des Sciences physiques et naturelles de Genève. — 4e période, t. XIX et XX, année 1905; 2 vol. in-8°.

Archives d'Électricité médicale, expérimentale et clinique. — Publiées par J. Bergonié, année 1905; 1 vol. in-8°.

Atti della Reale Accademia dei Lincei. — Vol. XIV, 1er semestre et 2e semestre 1905, nos 1 à 5 et 6 à 9; in-4°.

Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie. — T. XXIX, Année 1905; 1 vol. in-8°.

Bibliographie mensuelle des Sciences et de l'Industrie. — Année 1905; in-8°.

Bulletin scientifique trimestriel. — Publié par l'Association amicale des Élèves et anciens Élèves de la Faculté des Sciences de l'Université de Paris. Nos 1 à 3, 1905; in-8°.

Bulletin de la Société belge d'Électriciens. — T. XXII, année 1905; 1 vol. in-8°.

Bulletin de la Société française de Minéralogie. — Année 1905; nos 1 à 8, in-8°.

Bulletin de la Société internationale des électriciens. — Année 1905; 1 vol. in-8°.

Bulletin de la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale. — 4e série, année 1905; 1 vol. in-4°.

Bulletin de la Société philomathique de Paris. — Compte rendu sommaire des séances, t. VII, nos 1 à 5, 1905; in-8°.

Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles. — 5e série, vol. XLI, n° 151 à 153; 1 vol. in-8°.

Bulletin de l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore. — 3e série, t. V, nos 1 à 5, 1905; in-8°.

Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse. — Janvier à novembre 1905. — Mulhouse, Vve Bader et Cie, 1904; 1 vol. in-8°.

Bulletin international de l'Académie des Sciences de Cracovie. — Année 1905; 1 vol.

Bulletin of the Bureau of Standards. — S.-W. Stratton, Directeur (Washington). [illegible] nos 1 et 2, novembre 1904 et janvier 1905; in-8°.

Chronique Industrielle — Année 1905; in-4°.

Comptes Rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences. — T. CXL [illegible] XLI, 1905; 2 vol. in-4°.

Department of Commerce and Labor. — Bulletin of the Bureau of Standards. S. W. Stratton, director. Vol. I, nos 1 et 2, 1904-1905; in-8°.

Éclairage électrique (L'). — Revue hebdomadaire des transformations électriques, mécaniques, thermiques de l'énergie. Année 1905; 3 vol. in-4°.

Electrician (The). — Année 1904-1905; in-4°.

Électricien (L'). — Revue internationale de l'Électricité et de ses applications. — 2e série, t. XIV; année 1905; in-8°.

Fortschritte der Physik im Jahre 1904. — Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn, t. I, II et III; 3 vol. in-4°.

Halbmonatliches Litteraturverzeichnis der Fortschritte der Physik. — 4 Jahr. 1905; in-8°.

Internacia Sciencia Revuo, monato organo en Esperanto. — 1a Jaro, n° 13, 1905; in-8°.

Journal de Physique, théorique et appliquée. — Fondé par J.-Ch. d'Almeida et publié par MM. E. Bouty, A. Cornu, G. Lippmann, E. Mascart, A. Potier. 4e série, t. IV, 34e année, 1905; 1 vol. in-8°.

Journal de Physique, Chimie et Histoire naturelle élémentaires. — Publié par M. A. Buguet, nos 220 à 229; in-8°.

Journal of the Franklin Institute. — T. CLIX et CLX. Année 1905; 2 vol. in-8°.

Journal de la Société physico-chimique russe de Saint-Pétersbourg. — T. XXXVII, 1905; 1 vol. in-8°.

Journal of Physical Chemistry (Ithaca). — Vol. VIII, année 1904, et vol. IX, année 1905; in-8°.

Journal of the Institution of Electrical Engineers including original Communications on Telegraphy and Electrical Science. — Vol. XXXIV, nos 164 à 171, et vol. XXXV, nos 173 à 175; 2 vol. in-8°.

Journal de la Société Impériale technique russe. — T. XXXIX. Année 1905; 1 vol. in-8°.

Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam. Proceedings of the section of Science. — Vol. VIII, 1905; in-8°.

Memoirs and Proceedings of the Manchester litterary and philosophical Society. — T. XLIX, 1904-1905; 1 vol. in-8°.

Mémoires et Comptes Rendus des Travaux de la Société des Ingénieurs civils. — 6e série, 57e année, année 1905; 1 vol. in-8°.

Memorias y revista de la Sociedad cientifica « Antonio Alzate » (Mexico). — T. XIII, nos 9 et 10; t. XX, nos 5 à 10, et t. XXI, nos 1 à 8; in-8°.

Mémorial des poudres et salpêtres, publié par les soins du service des poudres et salpêtres avec l'approbation du Ministre de la Guerre. — T. XIII, 1er et 2e fasc. (1905-1906); in-8°.

Mitteilungen der physikalischen Gesellschaft Zürich. — Nos 8, 1905; in-8°.

Mois scientifique et industriel (Le). — Revue internationale d'informations; 7e année, 1905; 1 vol. in-8°.

Moniteur industriel. — Vol. XXXII, année 1905; 1 vol. in-4°.

Monographs of the United States geological Survey. — Vol. XLVII, 1904. Washington. 1 vol. in-4°.

National physical Laboratory (The). — Report for the year 1904. Londres, Collected Researches. Vol. I, 1890 à 1900; in-4°.

Nature (de Londres). — Année 1905; 1 vol. in-4°.

Nautical Meteorological Annual. — Année 1903; 1 vol. in-4°.

Nova Acta Regiæ Societatis Scientiarum Upsaliensis. — Année 1905; 1 vol. in-4°.

Nuovo Cimento (Il). — 5e série, t. IX et X, année 1905; 2 vol. in-8°.

Observatoire magnétique et météorologique de Zi-Ka-Wei (Chine). — Fondé et dirigé par les Missionnaires de la Compagnie de Jésus. — Bulletin des Observations, t. XXVIII, 1902; 1 vol. in-4°, et Calendrier annuaire pour 1905. — Shang-Haï, imprimerie de la Mission catholique; 3 vol. in-4°.

Philosophical Magazine and Journal of Science. — Sixth series, vol. IX et X, 1905; 5 vol. in-8°.

Photographie (La). — Publiée sous la direction de G.-H. Niewenglowski, années 1900 à 1903 et 1905; 1 vol. in-8°.

Physical Review. — A Journal of experimental and theoretical Physics, t. XX et XXI, 1905; 2 vol. in-8°.

Popular Astronomy. — Goodsell Observatory of Carleton College Northfield, Minnesota. — Vol. XIII, 1905; in-8°.

Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers. — Vol. XXIV, année 1905, nos 8 à 11; in-8°.

Proceedings of the American Philosophical Society held at Philadelphia for promoting useful knowledge. — Vol. XLIII, nos 179 et 180; in-8°.

Proceedings of the physical Society of London. — Vol. XX, nos 114 à 116; in-8°.

Proceedings of the Royal Society. — T. LXXV, LXXVI, LXXVII, nos 507 à 514; in-8°.

Radium (Le). — La radioactivité et les radiations, les sciences qui s'y rattachent et leurs applications; année 1905; in-8°.

Revue électrique. — T. III et IV. Année 1905; in-4°.

Revue générale des Sciences pures et appliquées. — Publiée par M. Louis Olivier, 16e année, 1905; 1 vol. in-4°.

Revue industrielle (La). — Année 1905; 1 vol. in-4°.

Revue technique. — Annales des Travaux publics et des Chemins de fer. 26e année, nos 1 à 22, 1905; in-4°.

Revue des Questions scientifiques. — Publiée par la Société scientifique de Bruxelles, T. VII, année 1905; 1 vol. in-8°.

Revue scientifique. — 5e série, t. IV, 1905; in-4°.

Revue des Sciences photographiques. — Année 1905; in-4°.

Royal Observatory Greenwich. — Observations, vol. I, 1902; in-4°.

Rozprawy Akademii Umiejetności. — **Waxiad Matematycsno-Przyrodniczy** (Acad. des Sciences de Cracovie). T. XLIV, 1904; in-8°.

Science abstracts, Physics and electrical Engineering. — Vol. VIII, 1905; 1 vol. in-8°.

Sitzungsberichte der Physikalisch-medizinischen Sozietät in Erlangen. — 36. Heft, 1904. Erlangen, K. b. Hof. und Univ.-Buchdruckerei von Junge und Sohn, 1905; 1 vol. in-8°.

Superintendent, Coast and geodetic Survey, Department of Commerce and Labor. — Report (july 1903 to june 30, 1904); appendice, nos 3 à 9. Washington, D.-C. (U. S. A.). 8 fasc. in-4°.

Technology quarterly and Proceedings of the Society of Arts. — Vol. XVIII, n° 1, 1905; 1 vol. in-8°.

The scientific Proceedings of the Royal Dublin Society. — Vol. XI, part 5, in-8°.

The economic Proceedings of the Dublin Society. — Vol. I, parts 5 et 6; in-8°.

The scientific Transactions of the Royal Dublin Society. — Vol. VIII, 2e série, part 1; 1904.

Tôkiô Sugaku. — Buturigaku Kwai Kizi. Hokuku, vol. II, nos 13 à 20; in-8°.

Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. — 1905; in-8°.

Transactions of the American Institute of electrical Engineers. — Vol. XXI; 1 vol. in-8°.

Université de Besançon. — Observatoire national astronomique, chronométrique et météorologique de Besançon. — *XVIe Bulletin chronométrique*, année 1903-1904, publié par M. *Lebeuf*, Directeur de l'Observatoire. Besançon, J. Millot et Cie, 1905; 1 br. in-4°.

University of Chicago (The). — Publications of the Yerkes Observatory. — Vol. 1903; in-4°.

University of Toronto Studies. — Nos 44 à 51. Papers from the chemical Laboratories physical Science, series n° 4; in-8°.

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. — Jahrg. 6, nos 2 à 21, 1905; in-8°.

Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel. Bd XVII, 1905: in-8°.

Zeitschrift für Instrumentonkunde. — Année 1905; in-8°.

Andrade (Jules). — Notes sur les perturbations de l'isochronisme et le principe des moments. (Extr. de la *France horlogère.*) Besançon, 1903. 1 br. in-8°.

— La théorie de la synchronisation des horloges. (Extr. des *Archives des Sciences physiques et naturelles.*) Genève, 1904. 1 br. in-8°.

— Chronométrie : Les régimes limites et la stabilité de la synchronisation. (Extr. de *Boltzmann-Festschrift.*) Leipzig, 1904. 1 br. in-8°.

— Recherches chronométriques. (Extr. de *Verhandlungen des dritten internationalen Mathematiker-Kongresses in Heidelberg, vom* 8 *bis* 13 *August* 1904.) Leipzig, 1905. 1 br. in-8°.

— Détermination des mouvements μ de solides aux trajectoires sphériques. (Extr. *Verhandlungen des dritten internationalen Mathematiker-Kongresses in Heidelberg, vom* 8 *bis* 13 *August* 1904.) Leipzig, 1905. 1 br. in-8°.

— L'enseignement scientifique aux écoles professionnelles et les Mathématiques de l'ingénieur. (Extr. de *Verhandlungen des dritten internationalen Mathematiker-Kongresses in Heidelberg, vom* 8 *bis* 13 *August* 1904.) Leipzig, 1905. 1 br. in-8°.

Armagnat (**H.**). — La Bobine d'induction. Paris, Gauthier-Villars, 1905. 1 vol. in-8°.

Benoist (**L.**). — Méthode et appareil de dosage dans les applications médicales de l'électricité statique. (Extr. des *Archives d'Électricité médicale expérim. et clin.*, 1905.) 1 br. in-8°.

Benoît (**René**) et **Guillaume** (**Ch.-Éd.**). — Les nouveaux appareils pour la mesure rapide des bases géodésiques. (Extr. des *Procès-verbaux des séances du Comité international des Poids et mesures.*) Paris, 1905; 1 br. in-8°.

Bertrand (**Gabriel**). — Étude biochimique de la bactérie du sorbose. (Thèse.) Paris, Gauthier-Villars, 1904. 1 br. in-8°.

Boltzmann (**L.**). — Leçons sur la théorie des gaz (traduction par MM. A. Gallotti et H. Bénard, 2e partie). Paris, Gauthier-Villars, 1905. 1 vol. in-8°.

Bordé (**Paul**). — Le Congrès d'Aérostation scientifique en 1904 (29 août-5 septembre), précédé de l'Histoire des différents Congrès, par M. W. de Fonvielle (Académie impériale des Sciences de Saint-Pétersbourg). Saint-Amand, Pivoteau et fils, 1905. 1 br. in-8°.

Bossavy (**J.**). — Les photographies des prétendus effluves humains. (Extr. du *Bulletin de la Société d'Agriculture, Sciences et Arts de la Sarthe*, 1900.) 1 fasc. in-8°.

Brocard (**H.**). — Louis de Puget, François Lamy, Louis Goblot : leur action scientifique d'après de nouveaux documents. Contribution à l'histoire des Sciences physiques et naturelles de 1671 à 1711. Bar-le-Duc, Comte Jacquet, 1905. 1 br. in-4°.

Burgess (**George-K.**). — Experimental Physics a course for freshem. Berkeley, Cal., 1902. 1 vol. in-8°.

Chavanne (**G.**). — Étude sur l'acide isopyromucique (Thèse). Paris, Gauthier-Villars, 1904. 1 br. in-8°.

Chwolson (**O.-D.**). — Lehrbruch der Physik, III. Band. Braunschweig, 1905. 1 vol. in-8°.

— Traité de Physique. Ouvrage traduit sur les éditions russe et allemande par E. Davaux. Édition revue et considérablement augmentée par l'auteur, suivie de Notes sur la Physique théorique par E. Cosserat et F. Cosserat. Tome Ier et Tome II (1er fasc.). Paris, A. Hermann, 1905; in-8°.

Claude (**Georges**). — Causeries sur le radium et les nouvelles radiations. Télégraphie sans fil. Rayons cathodiques. Haute fréquence. Paris, Dunod, 1905; 1 vol. in-8°.

Crowell (**H.-C.**) et **Lenth** (**G.-C.-D.**). — An investigation of the Doble needle regulating nozzle. June 1903. Abner Doble Company, Engineers, San Francisco (U. S. A.). 1 fasc. in-8°.

Dicksteina (**S.**). — Prace mathematyczno-fizyczne wydawane przy wspotudziale wi. Gosiewskiego, wi Natansona, A. Witrowskiegg i. K. Zorawskiego. Tome XVI, Warszawa, 1905. 1 vol. in-8°.

Émery (**H.**). — Le développement du cliché photographique. Étude raisonnée des principaux révélateurs employés en Photographie. Paris, Mendel, 1905. 1 vol. in-16.

Fabry (**Ch.**). — Notice sur la vie et les travaux de J. Macé de Lépinay. Partie scientifique (Extr. des *Annales de la Faculté des Sciences de Marseille*, t. XV, fasc. III).

Goppelsrœder (**Fr.**). — Studien über die Anwendung der Capillaranalyse : I, bei Harnuntersuchungen; bei vitalen Tinktionversuchen. Basel, Em. Birkhäusser, 1904. 1 vol. in-8°.

Guébhard (**A.**). — Un mode nouveau d'inversion photographique. (Extr. de *Science, Arts, Nature,* t. VI, n° 145, 1904.) 1 fasc. in-8°.

— Essai de représentation de la loi du développement photographique en fonction de sa durée. (Extr. des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 22 février 1904.) 1 fasc. in-8°.

— Sur une particularité nouvelle de l'inversion de l'image sous-posée par surdéveloppement lent. (Extr. du *Bulletin de la Société française de Photographie,* 2e série, t. XX, 1904.) 1 fasc. in-8°.

Guillaume (**Ch.-Ed.**). — L'échelle thermométrique normale et les échelles pratiques pour la mesure des températures. (Extr. des *Procès-verbaux des séances du Comité international des Poids et Mesures.*) Paris, 1905. 1 br. in-8°.

Guillaume (**Jacques**). — Notions d'Électricité. Son utilisation dans l'industrie, d'après les cours faits à la Fédération nationale des chauffeurs, conducteurs, mécaniciens, automobilistes de toutes industries. Paris, Gauthier-Villars, 1905. 1 vol. in-8°.

Guye (**Ch.-Eug.**). — Les hypothèses modernes sur la constitution électrique de la matière, rayons cathodiques et corps radioactifs. Conférence faite à la Faculté des Sciences de l'Université de Genève (février et mars 1904). 1re Partie : Théorie électrique de la matière; 2e Partie : Les arguments tirés de l'expérience. (Extr. du *Journal de Chimie physique,* t. II et t. III, 1904.) 1 br. in-8°.

Guye (**Ch.-Eug.**) et **Herzfeld** (**B.**). — L'hystérésis magnétique dans le fer aux fréquences élevées. Genève, Henry Kündig, 1904. 1 br. in-8°.

Guye (**Ch.-Eug.**). et **Schidlof** (**A.**). — L'hystérésis magnétique aux fréquences élevées dans le fer, le nickel et les aciers au nickel. (Extr. des *Archives des Sciences physiques et naturelles,* déc. 1904, janv. et févr. 1905.) 1 br. in-8°.

Guye (**Ch.-Eug.**) et **Denso.** — Sur la chaleur dégagée dans la paraffine soumise à l'action d'un champ électrostatique tournant à fréquence élevée. (Extr. des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 13 fév. 1905.) In-4°.

Helmholtz (**H.**). — Optique physiologique. Traduite par Émile Javal et M. Th. Klein. Paris, Victor Masson et fils, 1867. 1 vol. avec atlas in-8°.

Hemptinne (**A. de**). — Influence du magnétisme sur la luminescence des gaz. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1899.) 1 br. in-8°.

— Sur la synthèse de l'ammoniaque par l'électricité. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1902.) 1 br. in-8°.

— Sur la formation de l'ozone par les effluves électriques. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1901.) 1 br. in-8°.

— Sur l'action des effluves électriques et des rayons de Röntgen. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1897.) 1 br. in-8°.

— Ueber die Zersetzung einiger Stoffe unter dem Einfluss elektrischer Schwingungen. (Extr. de *Zeitschrift für physikalische Chemie,* 1898.) 1 br. in-8°.

— Sur l'action catalytique de la mousse de platine et de palladium. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1898.) 1 br. in-8°.

— Le magnétisme exerce-t-il une action sur l'intensité de la phosphorescence? (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1900.) 1 br. in-8°.

— Le magnétisme exerce-t-il une influence sur les réactions chimiques? (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1900.) 1 br. in-8°.

— Influence de la pression sur la décharge dans les gaz. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1902.) 1 br. in-8°.

— Sur la conductibilité électrique de la flamme et des gaz. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1901.) 1 br. in-8°.

— Sur la luminescence des gaz. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1902.) 1 br. in-8°.

— Influence de la pression sur la propagation de l'explosion dans les gaz. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1902.) 1 br. in-8°.

— Étude sur la pression critique de luminescence des gaz. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1903.) 1 br. in-8°.

— Influence de la décharge électrique par les pointes sur la combinaison et la décomposition des gaz. (Extr. de *Zeitschrift für physikalische Chemie,* 1903.) 1 br. in-8°.

— Sur la synthèse de l'acide stéarique par les décharges électriques. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Royale de Belgique,* 1904.) 1 br. in-8°.

— Ueber die Einwirkung von radioaktiven Stoffen auf das Leuchten von Gasen. (Extr. de *Zeitschrift für physikalische Chemie,* 1902.) 1 br. in-8°.

— Influence du magnétisme sur les solutions saturées. (Extr. des *Ann. de la Soc. scientif. de Bruxelles,* 1900.) 1 br. in-8°.

— Action de la lumière sur la conductibilité électrique des diélectriques liquides. (Extr. des *Ann. de la Soc. scientif. de Bruxelles,* 1902.) 1 br. in-8°.

— Sur les solutions saturées. (Extr. des *Ann. de la Soc. scientif. de Bruxelles,* 1899.) 1 br. in-8°.

— Sur la fluorescence. (Extr. des *Ann. de la Soc. scientif. de Bruxelles,* 1899.) 1 br. in-8°.

— Ueber die elektrische Leitfähigkeit der Flamme und der Gase. (Extr. de *Zeitschrift für physikalische Chemie,* 1893.) 1 br. in-8°.

Hepites (Stefan-C.). — Moyens d'investigation en Météorologie. Discours de réception à l'Académie Romana prononcé en séance solennelle le 12 avril 1903 et réponse du Dr L. Felix. Bucuresti, 1905. In-4°.

Kalocsinszky (Alexander-V.). — Ueber die Akkumulation der Sonnenwärme in verschiedenen Flüssigkeiten. (Extr. *Mathematischen und naturwissenschaftlichen Berichte aus Ungarn,* XXI.) 1 fasc. in-8°.

Kasperowicz (Konrad). — Studien über die Festigkeit von Dielektrika (Inaugural-Dissertation). Freiburg, St.-Paulus-Druckerei, 1904. 1 br. in-8°.

Kerntler (Franz). — Die Ermittlung des richtigen elektrodynamischen Elementargesetzes auf Grund allgemein anerkannter Thatsachen und auf dem Wege einfacher Anschauung. Budapest, Buch. der Pester Lloyd-Gesellschaft, 1905. 1 br. in-8°.

Korda (Désiré). — La séparation électromagnétique et électrostatique des minerais. Paris, *Éclairage électrique,* 1905. 1 vol. in-8°.

Kowalski (J. de). — Sur la décharge disruptive à très haute tension. (Extr. des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 22 février 1904.) In-4°.

— Sur les décharges glissantes. (Extr. des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 28 décembre 1903.) In-4°.

Kowalski (J. de) et **Zdanowski (B.).** — Nouvelle méthode pour la mesure des résistances électrolytiques liquides et plusieurs de ses applications. (Extr. des *Archives des Sciences physiques et naturelles,* t. XVIII, 1904.)

Le Bon (G.). — Intra-atomic energy. (Extr. de *Smithsonian Report,* 1903.) 1 br. in-8°.

Lietzau (Willy). — Beiträge zur Kenntnis der disruptiven Entladung (Inaugural-Dissertation). Freiburg, Gebrüder Fragnière, 1903. 1 br. in-8°.

Linders (Olof). — Die Formelzeichen. Ein Beitrag zur Lösung der Frage der algebraischen Bezeichnung der physikalischen, technischen and chemischen Grössen. Leipzig, Jah et Schunke, 1905. 1 br. in-8°.

Lumière et ses fils. — Annuaire photographique pour 1905. Monplaisir, Lyon, 1905. 1 vol. in-18.

Manuel de Justo y Sanchez-Blanco. — La Ensenanza en el extranjero. Memoria presentada al Gobierno de S. M. por el Catedratico de la Escuela superior de Artes è Industrias de Madrid, Doctor en Ciencias è Ingeniero geografo. Madrid, A. Alvarez, 1905. 1 br. in-8°.

Marie (C.). — Contribution à l'étude des acides phosphorés dérivés des acétones et des adéhydes (Thèse). Paris, Gauthier-Villars, 1904; 1 br. in-8°.

Marquis (**R.**). — Recherches dans la série du furfurane (Thèse). Paris, Gauthier-Villars, 1904. 1 br. in-8°.

Mathias (**E.**). — Remarques sur la théorie générale des fluides. (Extr. des *Mémoires de l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse,* 10e série, t. V.) 1 fasc. in-8°.

— Remarques à propos du Mémoire de W. Ramsay et Shields. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences : Congrès d'Angers,* 1903.) 1 fasc. in-8°.

— Sur la loi de distribution régulière de la composante verticale du magnétisme terrestre en France au 1er janvier 1896. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences : Congrès de Montauban,* 1902.) 1 fasc. in-8°.

— La loi de distribution régulière de la force du magnétisme terrestre en France au 1er janvier 1896. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences : Congrès d'Angers,* 1903.) 1 fasc. in-8°.

Maurain (**Ch.**). — Étude et comparaison des procédés de réduction de l'hystérésis magnétique. (Extr. du *Journal de Physique,* juin 1904.) In-8°.

— Sur les cohéreurs à diélectrique solide. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences : Congrès d'Angers,* 1903.) In-8°.

— Inauguration du buste de M. George Montefiore à l'Institut électrotechnique de Liége. Imp. La Meuse, Soc. anon., Liége, 1904. In-8°.

Mendel (**Charles**). — Agenda du photographe pour 1905 (11e année), suivi du Tout Photo, *Annuaire des amateurs de Photographie.* Paris, Mendel, 1905. 1 vol. in-8°.

Mendel (**Charles**). — Notions élémentaires de pratique stéréoscopique. (Extr. de la *Photo-Revue,* Paris, 1905.) 1 br. in-8°.

Mensbrugghe (**G. van der**). — Contribution à la théorie des ménisques capillaires. (Extr. des *Bull. de l'Acad. Roy. de Belgique,* 1905.) 1 br. in-8°.

Mercanton (**Paul-L.**). — Forages glaciaires. (Extr. des *Archives des Sciences phys. et nat.,* 1905.) 1 br. in-8°.

Metz (**G. de**). — Photographie des couleurs (en russe). 1905, in-8°.

— De l'importance de coordonner les notions des Sciences physiques acquises dans l'École secondaire avec l'enseignement des Facultés (en russe). 1905.

— Discours d'ouverture du 3e Congrès des Professeurs de Sciences naturelles de l'Enseignement secondaire, prononcé le 28 décembre 1904, à Kiew (en russe). In-8°.

Monin (**Pierre**). — Exercices pratiques de Physique. I. Pesanteur, Hydrostatique, Pneumatique, Chaleur (classe de seconde C et D). Paris, Henry Paulin et Cie, 1905. 1 fasc. in-8°.

Murat (**St.**). — Etalonnage des masses en série fermée. (Extr. de *Analele institutului meteorologic al Romanei.*) Bucarest, 1905. 1 br. in-8°.

Niewenglowski (**G.-H.**). — Traité élémentaire de Photographie pratique. Paris, Garnier frères, 1905. 1 vol. in-8°.

Nodon (**Albert**). — Méthodes micrographiques et stéréoscopiques. (Extr. des *Comptes rendus des Sociétes savantes de* 1904, Sciences.) Paris, Imprimerie nationale, 1905. 1 br. in-8°.

Pfaundler (**L.**). — Ueber die dunklen Strifen, welche sich auf den nach Lippmann's Verfahren hergestellten Photographien sich überdeckenden Spektren zeigen (Zenker'schen Streifen). (Extr. *Acad. Wissens. in Wien*, Feb. 1904.) In-8°.

— Die bisherige Tätigkeit der physikalisch-technischen Reichsanstalt, 1904. 1 br. in-8°.

— Die Tätigkeit der physikalisch-technischen Reichsanstalt im Jahre, 1903. (Extr. de *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 1904; Heft 5 u. 6.) 1 br. in-8°.

Pionchon (**J.**) — Leçons d'Electricité industrielle. (Institut électrotechnique de l'Université de Grenoble). Tome II (2e fascicule) : alterno-électrocinétique; alterno-électromagnétisme; alterno-électrothermie; alterno-électrochimie; électro-énergétique. Grenoble. A. Gratier et J. Rey, 1905. 1 vol. in-8°.

Quentin (**H.**). — Notes pratiques sur l'orthochromatisme. (Extr. de la *Photo-Revue*. Paris, 1905, N° 16.) 1 br. in-8°.

Romain de Wybranowski. — Étude sur la charge des condensateurs (Dissertation inaugurale). Fribourg, Saint-Paul, 1904. 1 br. in-8°.

Rothé (**E.**). — La photographie interférentielle des couleurs. (Extr. *Bulletin de la Société dauphinoise, amateurs photographes.*) Avril 1905. 1 br. in-8°.

Rouyer (**E.**). — La Gomme bichromatée. — La pose dans les papiers à dépouillement. Paris, Mendel, 1904. 1 vol. in-16.

Sartiaux (E.) et **Zetter** (Ch.). — Note sur un projet tendant à l'unification des petites vis d'un diamètre inférieur à 6mm. Unification des filetages. (Extr. du *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale*, septembre 1904.) 1 fasc. in-4°.

Schaffers (V.) (S.-J.). —Nouvelle théorie des machines électriques à influence. Bruxelles, Polleunis et Censerick, 1904. 1 br. in-8°.

Schoop (M.-U.). — Die industrielle Electrolyse des Wassers und die Verwendungsgebiete von Wasserstoff und Sauerstoff. (Extr. *Sammlung elektrotechnischer Vorträge*. Band. III. 1901.) 1 br. in-8°.

Spring (W.). — Sur l'origine des nuances vertes des eaux de la nature et sur l'incompatibilité des composés calciques, ferriques et humiques en leur milieu. (Extr. du *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, n° 7, 1905.) In-8°.

— Sur la limite de visibilité de la fluorescence et sur la limite supérieure du poids absolu des atomes. (Extr. du *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, n° 5, 1905.) In-8°.

Tranchant (L.). — La Photographie au charbon simplifiée. Une brochure de la collection de la *Photo-Revue*. Paris, Charles Mendel, 1905.

Trutat (Eug.). — Le Cliché photographique : choix du sujet; pose; manipulations. Paris, Mendel, 1905. 1 vol. in-16.

— Les Procédés pigmentaires. Paris, Mendel, 1905. 1 vol. in-16.

Turpain (Albert). — Leçons élémentaires de Physique, à l'usage des Candidats au certificat d'études physiques, chimiques et naturelles, avec une préface de M. P. Garbe. T. I : Pesanteur, statique des fluides, chaleur, travail et énergie. Paris, Vuibert et Nony, 1905. 1 vol. in-8°.

— L'évolution des théories électriques. (Esquisse de l'histoire de l'Electricité). Conférence faite à la Bourse du travail de Poitiers le 21 janvier 1905. Poitiers, A. Masson, 1905. Broch. in-8°.

— L'utilisation des ondes électriques. La Télégraphie sans fil et les autres applications des ondes hertziennes. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences*.) Congrès d'Angers, 1903. In-8°

— Les phénomènes d'électricité atmosphérique observés au moyen du cohéreur. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences*.) Congrès d'Angers, 1903. In-8°.

— Sur le fonctionnement des cohéreurs associés. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences.*) Congrès d'Angers, 1903. In-8°.

— Interruption du circuit primaire des bobines d'induction. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences.*) Congrès d'Angers, 1903. In-8°.

Turpain (**A.**) et **David** (**P.**). — Enregistrement d'orages par le cohéreur à l'observatoire du Puy de Dôme. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences.*) Congrès d'Angers, 1903. In-8°.

Wainwright (**Jacob-E.**). — A perpetuel motion of the second kind. Chicago, 1904. 1 opusc. in-8°.

Wiedemann (**Eilhard**). — Studien zur Geschichte Galileis. (Extr. *Physikalisch-medizinischen Societät in Erlangen,* 1904.) 1 br. in-8°.

— Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften. (Extr. *Physikalisch-medizinischen Societät in Erlangen,* 1904.) In-8°.

Witrowski (**A.-W.**). — Sur la dilatation de l'hydrogène. (Extr. du *Bulletin de l'Académie des Sciences de Cracovie,* juin 1905.) In-8°.

Zalocostas (**Pierre-M.**). — Recherches sur la constitution chimique de la Spongine. Paris, A. Davy, 1888. 1 br. in-8°.

Zenger (**Ch.-V.**). — Solution logarithmique des équations numériques. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences.*) Congrès de Grenoble, 1885. In-8°.

— La *Nova Persei* et la théorie électrodynamique du Monde. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences.*) Congrès de Montauban, 1902. In-8°.

— La périodicité des tempêtes d'après les observations de 1886 à 1895 aux bords de la mer allemande. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences.*) Congrès de Boulogne-sur-Mer, 1899. In-8°.

— L'œil photographique. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences.*) Congrès de Paris, 1900. In-8°.

— La périodicité des aurores australes observées pendant l'hivernage de la *Belgica* et l'électricité d'origine cosmique. (Extr. de *Ciel et Terre,* 1900.) In-8°.

— Beschreibung der Ausstellungs-Gegenstände. Prague, Jos. R. Viliweck, 1891. In-8°.

— Ueber den Zusammenhang der Erdstürne mit den planetaren Verhältnissen des Sonnensystems. (Extr. *Gesellschaft der Wissenschaften*, 1880.) In-8°.

— On the periodic change of climate caused by the moon. (Extr. *Dublin Phil. Mag. and Journal of Science*, 1868.) In-8°.

— Slunce a Sopky. Přednesl K. v. Zenger Dvordni rada a Prof. Praze ve Spolku architektuv a inženýzů v Kral. Českém due J. listopadu, 1902. Zvlastni Otisk Z « Technického Obzaru » R. 1903. In-8°.

— Les tremblements de terre et l'action périodique de l'électricité d'origine cosmique. (Extrait des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences*.) Congrès d'Ajaccio, 1901. In-8°.

— La Météorologie électrodynamique et son application à la prévision des grandes perturbations atmosphériques. (Extr. *Ciel et Terre*, 1900.) In-8°.

— Le mouvement d'une toupie dans le champ magnétique d'un puissant électro-aimant. (Extr. des *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des Sciences*.) Congrès de Boulogne-sur-Mer, 1899. In-8°.

Zenger (K.-W.). — Die Meteorologie der Sonne und das Wetter im Jahre 1900. Zugleich Wetter prognose für die Jahre 1900 u. 1910. Prague, 1901. In-8°.

— Festschrift zur Jubiläumsfeier des 50-jährigen Bestehens der naturforschenden Gesellschaft in Luzern überreicht den Teilnehmern an der Jahresversammlung der Schweizerischen naturforschenden Gesellschaft in Luzern, 11. bis 13. September 1905. Luzern, J. Schill, 1905. 1 vol. in-8°.

Ministère de l'Instruction publique et des Beaux-Arts, Comité des Travaux historiques et scientifiques. — Comptes rendus du Congrès des Sociétés savantes de Paris et des départements, tenu à la Sorbonne en 1904 (Section des Sciences). Paris, Imp. Nationale, 1904. 1 vol. in-8°.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE.

LISTE DES MEMBRES.

ANNÉE 1906.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE,

44, RUE DE RENNES, PARIS (6e).

(1906.)

BUREAU.

MM. AMAGAT (E.-H.), *Président.*
LE CHATELIER (H.), *Vice-Président.*
ABRAHAM (H.), *Secrétaire général.*
LUGOL, *Secrétaire.*
DEBIERNE, *Vice-Secrétaire.*
DE LA TOUANNE, *Archiviste-Trésorier.*

CONSEIL.

Membres résidants :		*Membres non résidants :*	
Mme CURIE.	1904.	MM. BLASERNA (Rome).	1904.
MM. HAMY (M.).		MAURAIN (Caen).	
MARAGE.		MICULESCU (Bucarest).	
PERRIN (J.).		TISSOT (Brest).	
BLONDIN (J.).	1905.	BEAULARD (Montpellier).	1905.
GUILLET.		GUILLOZ (Nancy).	
JOBIN (A.).		KOWALSKI (DE) (Fribourg).	
LEMOINE (J.).		LANG (VON) (Vienne).	
FERY (CH.).	1906.	BUISSON (Marseille).	1906.
HENRI (V.).		HALE (Mount Wilson).	
LANGEVIN (P.).		LAMOTTE (Clermont-Ferrand).	
PICOU (R.-V.).		LORENTZ (Leyde).	

ANCIENS PRÉSIDENTS.

1873.	MM.	FIZEAU.
1874.		BERTIN.
1875.		JAMIN.
1876.		QUET.
1877.		BECQUEREL (Ed.).
1878.		BLAVIER.
1879.		BERTHELOT.
1880.		MASCART.
1881.		CORNU.
1882.		GERNEZ.
1883.		JANSSEN.
1884.		POTIER.
1885.		MAREY.
1886.		SEBERT.
1887.		WOLF.
1888.		ROMILLY (de).
1889.		MASCART.
1890.		MALLARD.
1891.		FRIEDEL.
1892.		VIOLLE.
1893.		LIPPMANN.
1894.		JOUBERT.
1895.		CAILLETET.
1896.		BOUTY.
1897.		BECQUEREL (H .
1898.		BENOIT (R.)
1899.		BASSOT.
1900.		CORNU.
1901.		PELLAT.
1902.		POINCARÉ (H.).
1903.		GARIEL (C.-M.).
1904.		ARSONVAL (D').
1905.		DUFET (H.).

MM. ALMEIDA (d'), *Secrétaire général, Fondateur* (1873-1880).
JOUBERT, *Secrétaire général honoraire* (1880-1890).
PELLAT, *Secrétaire général honoraire* (1891-1898).
POINCARÉ (L.), *Secrétaire général honoraire* (1899-1900).
NIAUDET, *Trésorier-Archiviste honoraire* (1875-1882).
MAURAT, *Trésorier-Archiviste honoraire* (1883-1890).
GAY, *Trésorier-Archiviste honoraire* (1891-1898).

MEMBRES HONORAIRES (1).

MM. **KELVIN** (**Lord**), F. R. S., Professeur à l'Université de Glasgow (Écosse).

BELL (**Alex. Graham**), de Washington (États-Unis).

BERTHELOT (**M.**), Sénateur, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, Membre de l'Académie Française.

LIPPMANN (**Gabriel**), Membre de l'Institut.

JANSSEN (**J.**), Membre de l'Institut.

MASCART (**E.-E.-N.**), Membre de l'Institut.

RAYLEIGH (**Lord**), F. R. S., Professeur à l'Institution Royal de Londres (Angleterre).

VAN DER WAALS (**G.-D.**), Professeur à l'Université d'Amsterdam (Hollande).

DONATEURS (2).

	fr.
COMPAGNIE DES CHEMINS DE FER DU MIDI (**Baron d'EICHTHAL**)	2000

(1) *Membres honoraires décédés :*

MM.	A. Becquerel.	1874-78.
	V. Regnault.	1876-78.
	Secchi.	1876-78.
	Billet.	1876-82.
	Plateau.	1880-83.
	Jamin.	1882-86.
	Edlund.	1884-88.
	Broch.	1878-89.
	Joule.	1878-89.
	Hirn.	1890-90.
	Ed. Becquerel.	1882-91.
	Fizeau.	1873-96.
	Bertrand.	1890-1900.
	Rowland.	1893-1901.
	Cornu.	1895-1902.
	Stokes.	1878-1902.
	Potier.	1902-1905.

Extrait des Statuts : Art. IV. — Le titre de Membre honoraire est conféré comme un hommage et une distinction particulière à des physiciens éminents de la France et de l'Étranger.

Les Membres honoraires ont voix délibérative dans les séances de la Société et du Conseil. Ils sont nommés par la Société à la majorité des voix, sur la présentation du Conseil.

Il ne peut en être nommé plus de deux chaque année.

Leur nombre est de dix au plus.

(2) Les noms des personnes qui auront donné à la Société une somme supérieure ou égale à 500 francs resteront inscrits, avec le chiffre de la donation, immédiatement après les Membres honoraires, et avant les Membres à vie, sous le titre de Donateurs. Les Membres à vie pourront acquérir ce titre en ajoutant une somme de 300 francs à leur souscription perpétuelle. (Décision du Conseil du 1er décembre 1891.)

COMPAGNIE DES SALINS DU MIDI 1000fr

MM. **GUÉBHARD**, Agrégé des Facultés de Médecine (pour l'amélioration de la Bibliothèque)..... 10000

ANONYME (pour aider à la publication du volume des *Constantes*)..... 5000

JENNESSON, Principal de Collège (Legs)..... 500

ANONYME (Solde des comptes de la Société chez MM. Gauthier-Villars et fils)..... 5547,50

BISCHOFFSHEIM, Membre de l'Institut..... 1500

SAUTTER et **LEMONNIER**, Une machine dynamo.

JEUNET, Ancien Professeur au Lycée d'Angoulême..... 500

ROTHSCHILD (**Baron Edmond de**)..... 300

CANET..... 300

MARTIN (**Ch.**), de Chartres (Legs)..... 1000

ANONYME (pour la publication du tome I des *Données numériques*)..... 11000

ANONYME (pour la publication du tome II des *Données numériques*)..... 9600

GAUTHIER-VILLARS (pour la publication du tome I des *Données numériques*)..... 850,25

GAUTHIER-VILLARS (pour la publication du tome II des *Données numériques*)..... 734,25

COPPET (**de**) (pour la publication des *Données numériques*) 1000

ANONYME (pour aider à la publication du tome III des *Données numériques*)..... 6000

ANONYME (pour aider à la publication des Mémoires). 5000

ANONYME (pour missions scientifiques)..... 2000

NOGUÉ (**Émile**)..... 300

ROMILLY (**Félix Worms de**)..... 150000

GUÉBHARD..... 300

ANONYME..... 500

DROITS D'AUTEUR de la traduction allemande du *Recueil d'expériences*, de M. Abraham..... 367,80

MEMBRES A VIE (1).

MM. * D'Abbadie, Membre de l'Institut.

Abraham (Henri), Maître de Conférences à l'École Normale Supérieure, 45, rue d'Ulm. Paris, 5e.

* Abria, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

---

(1) Les Membres résidants ou non résidants sont libérés de toute cotisation moyennant un versement unique de 200 francs ou quatre versements de 50 francs pendant quatre années consécutives. Les sommes versées pour rachat des cotisations sont placées en valeurs garanties par l'État, et leur revenu seul peut être employé aux besoins de la Société. (Statuts, art. 3, dernier paragraphe.)

* Membres décédés.

MM. * D'Almeida, Inspecteur général de l'Instruction publique, Secrétaire général de la Société.

* Alvergniat, Constructeur d'instruments de physique.

Amagat (E.-H.), Membre de l'Institut, Examinateur d'admission à l'École Polytechnique, 19, avenue d'Orléans. Paris, 14e.

Ancel (Louis), Ingénieur des Arts et Manufactures, 13, rue Brochant. Paris, 17e.

Angot, Météorologiste titulaire au Bureau central météorologique, Professeur à l'Institut National Agronomique, 12, avenue de l'Alma. Paris, 8e.

Arnoux (René), Ingénieur civil, 45, rue du Ranelagh. Paris, 16e.

Arsonval (Dr d'), Membre de l'Institut, professeur au Collège de France, 12, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

Aubert, Professeur au Lycée Condorcet, 139, rue de Rome. Paris, 8e.

Babinski, Ingénr civil des Mines, 170 *bis*, boul. Haussmann. Paris, 8e.

Baille, Répétitr à l'École Polytechnique, 26, rue Oberkampf. Paris, 10e.

Baume-Pluvinel (comte de la), 7, rue de la Baume, Paris, 7e.

* Bandsept (Albert), Ingénieur.

Bardy (Charles), Directeur honoraire du service scientifique de Contributions indirectes, 30, rue de Miromesnil. Paris, 8e.

* Baron, ancien Directeur à l'Administration des Postes et des Télégraphes.

Bassée (Jules-Charles), Constructeur d'instruments de Physique, 4, avenue de la Dame-Blanche, à Fontenay-sous-Bois (Seine).

Becker, Préparateur de Physique au collège Rollin, avenue Trudaine. Paris, 9e.

Béclère (Dr Antoine), Médecin de l'Hôpital Saint-Antoine, 122, rue de Boëtie. Paris, 8e.

Becquerel (Henri), Membre de l'Institut, 6, rue Dumont-d'Urville. Paris, 16e.

Becquerel (Jean), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Assistant au Muséum, 88, boulevard Pereire. Paris, 16e.

Benoit (René), Correspondant de l'Institut, Directeur du Bureau international des Poids et Mesures, au Pavillon de Breteuil, à Sèvres (Seine-et-Oise).

Berger (Dr Émile). Membre correspondant des Académies royales de Médecine de Belgique et de Madrid, 3, rue Anatole de la Forge. Paris, 7e.

Bertin, Membre de l'Institut, Directeur du matériel au Ministère de la Marine, 8, rue Garancière. Paris, 6e.

Bienaymé, Inspecteur général du Génie maritime en retraite, à Toulon (Var).

Bischoffsheim (Raphaël-Louis), Membre de l'Institut, 3, rue Taitbout. Paris, 9e.

Bjerknes (Wilhelm), chargé de Cours à l'Université de Stockholm (Suède).

MM. * Blavier, Inspecteur général des Télégraphes, Directeur de l'École supérieure de Télégraphie.

Bloch (Eugène), Agrégé, Docteur ès sciences, 18, rue de l'Odéon. Paris, 6e.

Bloch (Salvador), Professeur au Lycée Saint-Louis, 14, rue de l'Estrapade. Paris, 5e.

Blondel, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur à l'École des Ponts et Chaussées, 41, avenue de La Bourdonnais. Paris, 7e.

Blondin, Professeur au Collège Rollin, 171, rue du Faubourg-Poissonnière. Paris, 9e.

Blondlot, Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 8, quai Claude-le-Lorrain, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

Boberil (le Vicomte Roger de), rue d'Orléans, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

Boitel, Professeur au Lycée Lakanal, 4, rue Houdan, à Sceaux (Seine).

Boizard, Agrégé préparateur à la Faculté des Sciences, 21, rue Cail. Paris, 10e.

Bordé (Paul), Ingénieur-opticien, 29, boulevard Haussmann. Paris, 9e.

Bordet (Lucien), ancien Inspecteur des Finances, ancien élève de l'École Polytechnique, Administrateur de la Cie des forges de Châtillon et de Commentry, 181, boulevard Saint-Germain. Paris, 7e.

Bourgarel (Paul), Professeur au Lycée Carnot, 145, boulevard Malesherbes. Paris, 17e.

Bourgeois (Léon), Dr ès sciences, Répétiteur à l'École Polytechnique, 1, boulevard Henri-IV. Paris, 4e.

Boulanger (Julien), Lieutenant-Colonel du Génie, Directeur des Services de la Télégraphie militaire et du Matériel de guerre du Génie, 2, rue Lecourbe. Paris, 15e.

Bouty, Professeur à la Faculté des Sciences, 5, rue du faubourg Saint-Jacques, Paris, 14e.

Branly (Dr E.), Professeur à l'École libre des Hautes-Études scientifiques et littéraires, 21, avenue de Tourville. Paris, 7e.

* Bréguet (Antoine), Ancien élève de l'École Polytechnique.

Brewer, Constructeur d'instruments pour les Sciences, 76, boulevard Saint-Germain. Paris, 5e.

Brillouin, Professeur au Collège de France, 31, boulevard de Port-Royal. Paris, 13e.

* Brion, Professeur au Lycée Saint-Louis.

* Brisse (Ch.), Professeur à l'École Centrale des Arts et Manufactures, Répétiteur à l'École Polytechnique.

Broca (Dr André), Répétiteur à l'École Polytechnique, Professeur agrégé à la Faculté de Médecine, 7, cité Vaneau. Paris, 7e.

Buisson, Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Marseille (Bouches-du-Rhône).

Brunhes (Bernard), Professeur à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand, Directeur de l'Observatoire du Puy-de-Dôme.

MM. Brylinski (Émile), Sous-Directeur du *Triphasé*, 5, avenue Teissonnière, à Asnières (Seine).

* Buchin, Ingénieur électricien.

* Cabanellas, Ingénieur électricien.

Cadot, Professeur au Lycée Carnot, 145, boulevard Malesherbes. Paris, 17e.

Cailho, Ingénieur des Télégraphes, 111, rue Mozart. Paris, 16e.

Canet, Directeur de l'Artillerie de MM. Schneider et Cie, Ancien Président de la Société des Ingénieurs civils, 87, avenue Henri-Martin. Paris, 16e.

Carpentier (Jules), Ingénieur-Constructeur, Membre du Bureau des Longitudes, 34, rue du Luxembourg. Paris, 6e.

Carimey, Professeur au Lycée Saint-Louis, 63, rue Claude-Bernard. Paris, 6e.

Carvallo, Examinateur des élèves à l'Ecole Polytechnique, 1, rue de Clovis. Paris, 5e.

Caspari, Ingénieur hydrographe de la Marine, 30, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

* Cauro (Joseph), Docteur ès sciences, Ancien Élève de l'École Polytechnique.

Chabaud (Victor), Constructeur d'instruments de Physique, 58, rue Monsieur-le-Prince. Paris, 6e.

Chairy, Professeur au Lycée Janson-de-Sailly, 60, rue du Ranelagh. Paris, 6e.

Chancel (Félix), Ingénieur des Arts et Manufactures, 34, rue Saint-Jacques, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

* Chautard, Doyen honoraire de la Faculté libre des Sciences de Lille.

Chauveau, Ancien Élève de l'École normale supérieure, Météorologiste adjoint au Bureau Central, 32, avenue Rapp. Paris, 7e.

Chauvin (Raphaël), Ingénieur électricien, 186, rue Championnet. Paris, 18e.

Chaves (Antonio-Ribeiro), 116, rua do Ouvidor, à Rio de Janerio (Brésil).

* Chervet, Professeur au Lycée Saint-Louis.

Claverie, Censeur au Lycée Condorcet, 65, rue Caumartin. Paris, 9e.

Clément (Louis), 18, rue Louis-le-Grand. Paris, 2e.

Colardeau (Emmanuel), Professeur au Collège Rollin, 13, rue de Navarin. Paris, 9e.

Colin (Th.), Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 6, rue Victor-Considérant. Paris, 14e.

Compagnie des chemins de fer du Midi, 54, boulevard Haussmann. Paris, 9e.

Compagnie des Salins du Midi, 84, rue de la Victoire. Paris, 9e.

* Contal, Préparateur de Physique au Collège Rollin.

Coppet (de), villa de Coppet, rue Magnan, à Nice (Alpes-Maritimes).

MM. * Cornu (A.), Membre de l'Institut, Professeur à l'École Polytechnique.

Cotton (A.), Maître de Conférences à l'École normale supérieure, 49, rue Saint-André-des-Arts. Paris, 6e.

Courtois (l'abbé F.), Missionnaire, Église Saint-Joseph, à Chang-Haï (Chine).

Crémieu (Victor), Dr ès Sciences, Préparateur à la Faculté des Sciences, 6, rue d'Ulm. Paris, 5e.

Culmann (Paul), Docteur ès sciences, 28, rue Vauquelin. Paris, 5e.

Curie (Mme Sklodowska), Professeur à l'École normale supérieure d'Enseignement secondaire pour les Jeunes filles, 108, boulevard Kellermann. Paris, 13e.

Curie (Pierre), Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 108, boulevard Kellermann. Paris, 13e.

Dambier, Professeur au Collège Stanislas, 44, rue de Fleurus. Paris, 6e.

Defforges (Général G.), commandant la 78e Brigade. Villa Saint-Michel, à Toul (Meurthe-et-Moselle).

Delebecque, Ingénieur des Ponts et Chaussées, à Thonon (Haute-Savoie).

Diot, Professeur au Lycée Condorcet, 72, rue Nollet. Paris, 17e.

* Dollfus (Eugène), Chimiste, fabricant d'indiennes, à Mulhouse (Alsace).

Dongier, Docteur ès Sciences, Sous-Directeur du Laboratoire de Physique (Enseignement) de la Faculté des Sciences, 87 *bis*, Grande Rue, à Bourg-la-Reine (Seine).

Drouin (Félix), Ingénieur, 1 *bis*, avenue de Longchamps, à Boulogne-sur-Seine (Seine).

* Duboscq (Jules), Constructeur d'instruments de Physique.

* Duclaux, Membre de l'Institut, Directeur de l'Institut Pasteur.

Duclos, Ancien Directeur d'École normale à Cérisols, par Fabut (Ariège).

Duddell (W.), Ingénieur, 47, Hans-Place, London S. W. (Angleterre).

* Dufet (H.), Maître de Conférences à l'École normale supérieure, Professeur au Lycée Saint-Louis.

Dumoulin-Froment, Constructeur d'instruments de précision, 85, rue Notre-Dame-des-Champs. Paris, 6e.

Durand, Préparateur à la Faculté des Sciences, 50, rue Monge. Paris, 5e.

Dybowski, Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 16, rue Rottembourg. Paris, 12e.

Engel, Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, 2, rue Rosa-Bonheur. Paris, 7e.

Faivre-Dupaigre, Inspecteur d'Académie, 95, boul. St-Michel. Paris, 5e.

Favé, Ingénieur hydrographe en chef de la Marine, 1, rue de Lille. Paris, 7e.

* Fernet, Inspecteur général honoraire de l'Instruction publique.

MM. Fontaine (Hippolyte), Ingénieur électricien, 58, rue Notre-Dame-des-Champs. Paris, 6e.

Fortin (Charles), 59, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

Foussereau, Docteur ès sciences, 5, place de Jussieu. Paris, 5e.

Foveau de Courmelles (Dr), 26, rue de Châteaudun. Paris, 9e.

Fredet (Henri), Industriel, à Brignoud (Isère).

* Friedel, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

Galimard, Industriel, à Flavigny-sur-l'Ozerain (Côte-d'Or).

Gall (Henry), Directeur de la Société d'Électrochimie, 5, rue Albert-Joly, à Versailles (Seine-et-Oise).

Gariel (C.-M.), Membre de l'Académie de Médecine, Professeur à la Faculté de Médecine, 6, rue Édouard-Detaille. Paris, 17e.

Gascard (A.), Professeur à l'École de Médecine, Pharmacien des hôpitaux, 33, boulevard Saint-Hilaire, à Rouen (Seine-Inférieure).

Gaumont (L.), Directeur du Comptoir général de Photographie, 57, rue Saint-Roch. Paris, 1er.

* Gauthier-Villars, Libraire-Éditeur.

Gay (Jules), Examinateur à l'École Militaire de Saint-Cyr, 16, rue Cassette. Paris, 6e.

Gayon, Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, Directeur de la Station agronomique, 7, rue Dufour-Dubergier, à Bordeaux (Gironde).

Gernez, Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, 80, rue d'Assas. Paris, 6e.

Gibert (Eugène-Louis-Marie), Chef d'escadron d'Artillerie coloniale, 9 *bis*, rue Baudin, à Rochefort (Charente-Inférieure).

Godard (Léon), Docteur ès sciences, 28, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

Godefroy (l'abbé), Ancien Professeur de Chimie à l'Institut catholique.

Godron (H.), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 52, quai du Mont-Riboudet, à Rouen (Seine-Inférieure).

Goisot (G.), Ingénieur, 10, rue Bélidor. Paris, 17e.

Goloubitzky, Collaborateur de la Société des Amis des Sciences de Moscou, à Kalouga Faroussa (Russie).

* Gotendorf (Silvanus).

Gouré de Villemontée, Docteur ès Sciences, Professeur au Lycée Buffon, 31, rue de Poissy. Paris, 5e.

Gramont (Arnaud de), Docteur ès sciences, 179, rue de l'Université. Paris, 7e.

Gray (Robert Kaye), Ingénieur électricien de l'India-Rubber, Gutta-percha and Telegraph Works Co limited, à Londres (Angleterre).

Grosseteste (William), Ingénieur, 67, avenue Malakoff. Paris, 16e.

Grouvelle, Ingénieur, Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, 18, avenue de l'Observatoire. Paris, 6e.

Guébhard (Dr Ad.), Agrégé des Facultés de Médecine, à Saint-Vallier-de-Thiey (Alpes-Maritimes).

MM. * Hugo (comte Léopold).

Hadamard (Jacques), Professeur-adjoint à la Faculté des Sciences, 25, rue de Humboldt. Paris.

Hamy (Maurice), Astronome titulaire à l'Observatoire, 16, rue de Bagneux. Paris, 6e.

Hemptinne (Alexandre de), 56, rue de la Vallée, à Gand (Belgique).

Henry (Alfred), Ingénieur de la Raffinerie A. Sommier et Cie, 145, rue de Flandre, à Paris.

Huet (Ernest), Docteur en Médecine, 21, rue Jacob. Paris, 6e.

Husson (Léon), Contrôleur du câble télégraphique, à Haïphong (Tonkin).

Infreville (Georges d'), Électricien de la *Western Union Telegraph*, Expert de la *National Bell Telephone Co*, 110, Liberty Street, New-York (États-Unis).

* Jamin, Membre de l'Institut.

Janet (Paul), Chargé de Cours à la Faculté des Sciences, Directeur du Laboratoire central et de l'École supérieure d'Électricité, 6, rue du Four. Paris, 6e.

Javal, Membre de l'Académie de Médecine, 5, boulevard La Tour-Maubourg. Paris, 7e.

Javal (Jean), Membre du Conseil général de l'Yonne, 45, rue de Boulainvilliers. Paris, 16e.

Javaux (Émile), Administrateur-Directeur de la Société *Gramme*, 20, rue d'Hautpoul. Paris, 19e.

* Jennesson. Ancien Principal.

Jénot, Professeur honoraire au Collège Rollin, 17, rue Caulincourt. Paris, 18e.

* Jeunet, Professeur honoraire.

Jobin (A.), Ancien Élève de l'École Polytechnique, successeur de M. Laurent, 21, rue de l'Odéon. Paris, 6e.

* Joly, Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Paris.

Joubert, Inspecteur général de l'Instruction publique, 67, rue Violet. Paris, 15e.

* Kerangué (Yves de), Capitaine en retraite.

Knoll, Préparateur de Physique au Lycée Louis-le-Grand. Paris, 5e.

Koechlin (Horace), Chimiste, 19, avenue du Mont-Riboudet, à Rouen (Seine-Inférieure).

Korda (Désiré), Ingénieur, Administrateur de la Société française d'électricité A. E. G., 15, rue Ambroise-Thomas. Paris, 9e.

Korolkoff (Alexis), Lieutenant-Colonel d'Artillerie russe, Professeur de physique à l'Académie d'Artillerie de Saint-Pétersbourg (Russie).

Krouchkoll, Docteur ès sciences et Docteur en médecine, Chef des Travaux pratiques de Physique à la Faculté des Sciences, 150, avenue Wagram. Paris, 17e.

Lacour, Ingénieur civil des Mines, 60, rue Ampère. Paris, 17e.

MM. Lapresté, Professeur au Lycée Buffon, 7, rue Charlet. Paris, 15e.

Laurent (Léon), Ancien constructeur d'instruments d'optique, 21, rue de l'Odéon. Paris, 5e.

Laviéville (Augustin), Inspecteur honoraire de l'Académie de Paris, 3, rue Legoff. Paris, 5e.

Le Bel, Ancien Président de la Société chimique, 250, rue Saint-Jacques. Paris, 5e.

Leblanc (Maurice), Ancien Élève de l'École Polytechnique, villa Montmorency, 1, avenue de Bouflers. Paris, 16e.

* Lechat, Professeur honoraire du Lycée Louis-le-Grand.

Le Chatelier (André), Ingénieur en chef de la Marine, 331, rue Paradis, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

Le Chatelier (Henry), Ingénieur des Mines, Professeur au Collège de France et à l'École des Mines, 73, rue Notre-Dame-des-Champs. Paris, 6e.

Le Chatelier (Louis), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 4, rue Bara. Paris, 5e.

* Le Cordier (Paul), Chargé de Cours à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

Leduc (A.), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 84, boulevard Saint-Michel.

Lefebvre (Pierre), Professeur au Lycée, 67, boulevard Faidherbe, à Douai (Nord).

Lemoine (E.), Ancien Élève de l'École Polytechnique, Chef honoraire du Service de la vérification du Gaz, 4, boulevard de Vaugirard. Paris, 15e.

* Lemonnier, Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique.

* Lemström (Selim), Professeur émérite de l'Université de Helsingfors (Finlande).

Lequeux, Ingénieur des Arts et Manufactures, 64, rue Gay-Lussac. Paris, 2e.

Leroy, Professeur au Lycée Michelet, 245, boulevard Raspail. Paris, 14e.

* Lespiault, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux (Gironde).

* Létang (Paul), Ingénieur électricien.

Létang (Dr Marc), 12, rue Desrenaudes. Paris, 17e.

Leuilliux (Dr), Médecin de la Cie des Chemins de fer de l'Ouest, à Conlie (Sarthe).

Levesque (Lieutenant), Section de Géodésie du Service géographique de l'Armée, 140, rue de Grenelle. Paris, 7e.

Limb, Docteur ès sciences, Ingénieur, Conseil de la Maison Gindre frères et Cie de Lyon, 8, quai d'Occident, à Lyon.

Lippmann, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 10, rue de l'Éperon. Paris, 5e.

Lyon (Gustave), Ancien Élève de l'École Polytechnique, Ingénieur civil des Mines, 24 *bis*, rue Rochechouart. Paris, 9e.

MM. * Macé de Lépinay, Professeur à la Faculté des Sciences de Marseille (Bouches-du-Rhône).

Mach (Dr E.), Professeur de Physique à l'Université de Vienne (Autriche).

Macquet (Auguste), Ingénieur au corps des Mines, Professeur à l'Ecole des Mines du Hainaut, à Mons (Belgique).

* Mallard, Membre de l'Institut, Inspecteur général des Mines, Professeur de Minéralogie à l'École des Mines.

Maneuvrier, Directeur adjoint du Laboratoire des Recherches (Physique) à la Sorbonne. Paris, 5e.

Marie, Préparateur de Physique au Lycée Charlemagne. Paris, 4e.

* Martin (Ch.) de Chartres.

Mascart, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France, 176, rue de l'Université. Paris, 7e.

Massin, Ingénieur des Télégraphes, 61, rue de Vaugirard. Paris, 6e.

* Masson (G.), Libraire-Éditeur.

Maurain, Professeur à la Faculté des Sciences de Caen (Calvados).

* Maurat, Professeur honoraire du Lycée Saint-Louis.

Menier (Henry), 8, rue de Vigny. Paris, 8e.

Meslin (G.), Professeur à la Faculté des Sciences de Montpellier (Hérault).

Mesnager (Augustin), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Ingénieur des canaux de la Ville de Paris, 182, rue de Rivoli. Paris, 1er.

Mestre, Ingénieur à la Cie des Chemins de fer de l'Est, 168, rue Lafayette. Paris, 10e.

Métral (Pierre), Agrégé des Sciences Physiques, Professeur à l'École Colbert, 239 *bis*, rue Lafayette. Paris, 10e.

* Meyer (Bernard), Ingénieur des Télégraphes.

Michel (Auguste), Constructeur d'instruments de Physique, 92, rue de Bondy. Paris, 10e.

Molteni (A.), 15, rue Origet, à Tours (Indre-et-Loire).

* Moncel (Comte du), Membre de l'Institut.

Montefiore (Lévi), Sénateur, Ingénieur, Fondateur de l'Institut électrotechnique, à Liége (Belgique).

Morize (Henri), Ingénieur civil, Docteur ès sciences, Professeur de physique à l'École Polytechnique, rua Princeza Impérial, n° 20, Antiago, à Rio-de-Janeiro (Brésil).

Moser (Dr James), Privat-Docent à l'Université, VIII/1, Laudon-gasse, 25, à Vienne (Autriche).

Muirhead (Dr Alexandre F. C. S.), 3, Elm Court. Temple E. C., Londres (Angleterre).

Nagaoka (H.), Docteur ès sciences, Professeur de Physique à l'Université de Tokio (Japon).

Nerville (de), Ingénieur des Télégraphes, 59, rue de Ponthieu. Paris, 8e.

Nodon (Albert), Ingénieur-Conseil, 12, rue de Moulis, à Bordeaux (Gironde).

MM. Nogué (Émile), Attaché à la Maison Pellin-Duboscq, 138, rue d'Assas. Paris, 6e.

* Niaudet, Ingénieur civil.

Ogier (Jules), Membre du Comité consultatif d'Hygiène publique, Chef du Laboratoire de Toxicologie à la Préfecture de police, 49, rue de Bellechasse. Paris, 7e.

Ollivier (A.), Ingénieur civil, 2, rue Manuel. Paris, 9e.

Oumoff (Nicolas), Professeur de Physique à l'Université de Moscou (Russie).

Palmade, Professeur au Lycée de Montpellier (Hérault).

Palmade (F.), Chef de Bataillon du Génie, Chef du Génie, à Bourges (Cher).

Patte (Lucien), Professeur au Lycée, 12, rue Louis-Joblot, à Bar-le-Duc (Meuse).

Pavlidès (Démosthènes), Docteur en Médecine.

Pellat (H.), Professeur à la Faculté des Sciences, 23, avenue de l'Observatoire. Paris, 6e.

Pérard (L.), Professeur à l'Université, 101, rue Saint-Esprit, Liége (Belgique).

* Pérot, Dessinateur et Graveur.

Pérot (Alfred), Professeur honoraire de la Faculté des Sciences de Marseille, Directeur du Laboratoire d'Essai au Conservatoire national des Arts et Métiers, 292, rue Saint-Martin. Paris, 3e.

Perreau, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Nancy (Meurthe-et-Moselle).

Perrier (Lieutenant), État-Major de l'Armée, Service géographique, 140, rue de Grenelle. Paris, 7e.

Perrin (Jean), Chargé de Cours à la Faculté des Sciences, 18, boulevard Arago. Paris, 13e.

Picou (R.-V.), Ingénieur des Arts et Manufactures, 47, rue Saint-Ferdinand. Paris, 17e.

Piltschikoff (Nicolas), Professeur à l'Université d'Odessa (Russie).

Poincaré (A.), Inspecteur général des Ponts et Chaussées en retraite, 10, rue de Babylone. Paris, 7e.

Poincaré (Lucien), Inspecteur général de l'Instruction Publique, 130, rue de Rennes. Paris, 6e.

Pollard (Jules), Directeur du Génie maritime, Directeur de l'Établissement d'Indret, par Basse-Indre (Loire-Inférieure).

Popp (Victor), Ancien Administrateur-Directeur de la Compagnie des horloges pneumatiques, 9, rue Margueritte. Paris, 17e.

* Potier, Membre de l'Institut, Ingénieur en chef des Mines.

Poussin (Alexandre), Ingénieur, 7, rue de l'Équitation, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

Prieur (Albert), Industriel, 76, boulevard Malesherbes. Paris, 6e.

Pupin, Docteur en Médecine, 27, quai de la Tournelle. Paris, 5e.

Puyfontaine (Comte de), 34, avenue Friedland. Paris, 8e.

MM. * Raffard (N.-J.), Ingénieur.

Raveau (C.), Physicien au Laboratoire d'Essais du Conservatoire national des Arts et Métiers, 61, boulevard Sébastopol. Paris, 7e.

Raymond, Ingénieur principal des Messageries maritimes à la Ciotat (Bouches-du-Rhône).

* Raynaud, Directeur de l'École supérieure de Télégraphie.

Renault (Albert), Chimiste, 13, rue Paul-Louis Courier. Paris, 7e.

Ribière (Charles), Ingénieur des Ponts et Chaussées (Service des phares), 13, rue de Siam. Paris, 16e.

* Rigout (A.), Docteur en Médecine.

* Rilliet, Professeur à l'Université de Genève (Suisse).

Rivière (Charles), Professeur au Lycée Saint-Louis, 30, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

Rodde (Ferd.), 18, rue Bervic. Paris, 18e.

Rodde (Léon), rua do Ouvidor, 107, à Rio de Janeiro (Brésil).

Rodocanachi (Emmanuel), 54, rue de Lisbonne. Paris, 8e.

* Roger, Chef d'institution honoraire.

* Romilly (Félix Worms de), ancien Président de la Société française de Physique.

Romilly (Paul Worms de), Ingénieur en chef des Mines, 7, rue Balzac. Paris, 8e.

Rothschild (baron Edmond de), 41, rue du Faubourg-Saint-Honoré. Paris, 8e.

Rozier (F.), Docteur en Médecine, 19, rue du Petit-Pont Paris, 5e.

Sagnac (G.), Chargé des cours à la Faculté des Sciences, 4, rue Boissonnade. Paris, 14e.

Sainte-Claire Deville (Émile), Ingénieur à la Compagnie du gaz. 12, rue Alphonse-de-Neuville. Paris, 17e.

* Sainte-Claire Deville (Henri), Membre de l'Institut.

Saintignon (F. de), Maître de Forges à Longwy (Meurthe-et-Moselle).

* Salet, Maître de conférences à la Faculté des Sciences.

Sarran (E.), Professeur au Lycée, 20, cours Pasteur, à Bordeaux (Gironde).

* Schwedoff, Professeur à l'Université d'Odessa (Russie).

Sebert (le Général), Membre de l'Institut, Administrateur des Forges et Chantiers de la Méditerranée, 14, rue Brémontier. Paris, 17e.

Seligmann-Lui, Directeur-Ingénieur des Télégraphes, 78, rue Mozart. Paris, 16e.

Sentis, professeur au Lycée, 17, boul. de Bonne, à Grenoble (Isère).

Serpollet, Ingénieur, 9, rue de Stendhal. Paris, 20e.

Siegler (Jean), ingénieur des Mines, 14, rue Gambetta, à Saint-Étienne (Loire).

Solvay (Ernest), Industriel, 43, rue des Champs-Élysées, à Bruxelles (Belgique).

Sparre (le comte Magnus-Louis-Marie de), Doyen de la Faculté catholique des Sciences, 7, avenue de l'Archevêché, à Lyon (Rhône).

MM. * Spottiswoode (W.), Président de la Société royale de Londres (Angleterre).

Strauss, Colonel Directeur du Génie, à Toul (Meurthe-et-Moselle).

Street (Charles), Ingénieur des Arts et Manufactures, 56, rue de Londres. Paris, 9e.

Teploff, Colonel du Génie impérial russe, rue Vladimirskaïa, 15, Maison Friederichs, Saint-Pétersbourg (Russie).

Termier, Ingénieur des Mines, Professeur à l'École nationale des Mines, 71, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

* Terquem, Professeur à la Faculté des Sciences de Lille.

Thélier (Marcel), 9, avenue de Messine. Paris, 8e.

* Thollon, Physicien à l'Observatoire de Nice.

Thomas, Professeur à l'École supérieure des Sciences d'Alger (Algérie).

Thouvenel, Professeur au Lycée Charlemagne, 19, boulevard Morland. Paris, 4e.

Tombeck, Docteur ès sciences, 59, boulevard Pasteur. Paris, 15e.

Touanne (G. de la), Ingénieur des Télégraphes, 80, rue Bonaparte. Paris, 6e.

Troost, Membre de l'Institut, 84, rue Bonaparte. Paris, 6e.

Tuleu, Ingénieur, 58, rue Hauteville. Paris, 10e.

Ullmann (Jacques), Constructeur électricien, 26, boulevard Saint-Denis. Paris, 10e.

Vagniez (Edouard), à Amiens (Somme).

* Van den Kerchove, Sénateur, Gand (Belgique).

* Vaschy, Ingénieur des Télégraphes, Répétiteur à l'École Polytechnique.

Vautier (Théodore), Professeur adjoint de Physique à la Faculté des Sciences, 30, quai Saint-Antoine, à Lyon (Rhône).

* Verrier (J.-F.-G.).

Villard (P.), Docteur ès sciences, 45, rue d'Ulm. Paris, 5e.

Villiers (Antoine), Professeur à l'École de Pharmacie, 30, avenue de l'Observatoire. Paris, 14e.

Vincent (G.), Professeur au Lycée Saint-Louis, 26, rue de Staël. Paris, 15e.

Violle, Membre de l'Institut, Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, 89, boulevard Saint-Michel. Paris, 5e.

Walckenaer, Ingénieur en chef des Mines, Professeur à l'École des Mines, 218, boulevard Saint-Germain. Paris, 7e.

Wallon (E.), Professeur au Lycée Janson-de-Sailly, 65, rue de Prony. Paris, 17e.

* Warren de la Rue, Correspondant de l'Institut.

Weiss (Dr Georges), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur agrégé de Physique à la Faculté de Médecine, 20, avenue Jules-Janin. Paris, 16e.

Weiss (Pierre), Professeur à l'École Polytechnique de Physique de Zurich (Suisse).

MM. Werlein (Ivan), Constructeur d'instruments d'Optique, 8, rue d'Ulm. Paris, 5e.

Weyher, Ingénieur, Administrateur-Directeur de la Société centrale de Construction de machines, 36, rue Ampère. Paris, 17e.

Wuilleumier (H.), Docteur ès Sciences, 20 *bis*, rue Chaptal. Paris, 9e.

* Wunschendorff, Ingénr-Administr des Postes et des Télégraphes.

Wyrouboff, Professeur au Collège de France, 20, rue Lacépède. Paris, 5e.

Badonnel (Marie-Gabriel-Victor), Professeur au Lycée, 2, square Castan, à Besançon (Doubs).

Baillaud (Jules), Astronome adjoint à l'Observatoire, 148, boulevard du Montparnasse. Paris, 14e.

Bosler (Jean), Ancien élève de l'École Polytechnique, Licencié ès Sciences, 5, rue du Faubourg-Saint-Jacques. Paris, 14e.

Delvalez (G.), Professeur au Lycée Condorcet, 16, avenue Ledru-Rollin. Paris, 12e.

Devaux-Charbonnel, Ingénieur des Télégraphes, 286, boulevard Raspail. Paris, 14e.

Dubois (René), Professeur à l'École Turgot, 23, rue des Fossés-Saint-Jacques. Paris, 5e.

Dufour (A.), Agrégé, Préparateur de Physique à l'École Normale supérieure, 45, rue d'Ulm. Paris, 5e.

Gérard (Anatole), Ingénieur électricien, 16, rue des Grandes-Carrières. Paris, 18e.

Gibert, Professeur de Physique à l'École Colbert, 146, boulevard Magenta. Paris, 10e.

Ginsberg (Alexandre), Collaborateur scientifique de la maison Krauss.

Guillet, Secrétaire de la Faculté des Sciences, 158, rue Saint-Jacques. Paris, 5e.

Icole (Léon), professeur au Lycée de Douai (Nord).

Jacobs (Fernand), Président de la Société Belge d'Astronomie, 21, rue des Chevaliers, à Bruxelles (Belgique).

Judic (Georges), Ingénieur électricien, 26, rue de Tourlaque. Paris, 18e.

Lafay (A.), Capitaine, Professeur à l'École polytechnique, 98, rue d'Arcueil, à Malakoff (Seine).

Lampa (A.), Professeur à l'Université, Rieglergasse, 5, à Vienne XVIII (Autriche).

Lugol (Paul), Professeur au Lycée Saint-Louis, 86, avenue de Wagram. Paris, 17e.

Massoulier, Professeur au Lycée Henri-IV, 97, villa Brune. Paris, 14e.

More (Louis Tranchard), Ph. D., Professeur de Physique à l'Université de Cincinnati, à Cincinnati (Ohio), U. S. A.

MM. Moulin, Attaché au laboratoire de Physique du Collège de France, 6, rue Chevreul, Paris, 11e.

Neveu (Raoul), Constructeur d'instruments de Physique, 35, rue de la Montagne-Sainte-Geneviève. Paris, 5e.

Simon (L.-J.), Sous-Directeur du Laboratoire de Chimie à l'École Normale Supérieure, 15, rue Vauquelin. Paris, 5e.

Rothé, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 21, rue Malzéville, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

Timiriazeff, Professeur à l'Université et à l'Académie Agronomique de Moscou (Russie).

Touren (Charles), Professeur au Collège Rollin, 56, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

Willot (A.), Licencié ès Sciences, 24, rue Cassette. Paris, 6e.

LISTE DES MEMBRES DE LA SOCIÉTÉ.

MM.

ABRAHAM (**Henri**), Maître de Conférences à l'École Normale supérieure, 45, rue d'Ulm. Paris, 5e.

ADAM (**Étienne**), Professeur au Lycée Voltaire, 19, avenue du Bel-Air. Paris, 12e.

ADAM (**Jules-Théophile**), Professeur au Collège, 12, rue de Rome, à Calais (Pas-de-Calais).

ALBERTOTTI (**Guiseppe**), Professeur d'Oculistique à l'Université de Modène (Italie).

ALIAMET, Inspecteur, Chef du Laboratoire électrochimique au Chemin de fer du Nord, 44, rue de la Concorde, à Asnières (Seine).

ALLAIRE (Dr **G.**), Chef des travaux de Physique à l'École de Médecine et de Pharmacie, Chef du Service d'électrothérapie et de radiographie de l'Hôtel-Dieu, 5, rue Santeuil, à Nantes (Loire-Inférieure).

ALLARD (**Félix**), Docteur en Médecine, 23, rue Blanche. Paris, 9e.

ALLUARD, Professeur honoraire à la Faculté des Sciences, 22 *bis*, place de Jaude, Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

AMAGAT (**E.-H.**), Membre de l'Institut, Examinateur d'admission à l'École Polytechnique, 19, avenue d'Orléans. Paris, 14e.

AMES (**Joseph-S.**), Professor of Physics, Director of the Physical Laboratory, John Hopkins University, Baltimore, Maryland (U. S. A.).

AMIEUX (Mlle **Anne-Léontine-Nicolas**), Professeur de Sciences aux Lycées Lamartine et Victor-Hugo, 16, rue d'Angoulême. Paris, 11e.

ANASTASSIADÈS (**An.**), Docteur, Professeur de Mathématiques à l'École évangélique, à Smyrne (Turquie).

ANCEL (**Louis**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 13, rue Brochant. Paris, 16e.

ANDRADE (**Jules-Frédéric-Charles**), Professeur à la Faculté des Sciences, 3, villas Bisontines, à Besançon (Doubs).

ANDRAULT (**Louis-Gustave-Adolphe**), Professeur au Lycée, 10, rue des Bains, à Grenoble (Isère).

ANDRÉ (**Ch.**), Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, Directeur de l'Observatoire de Lyon (Rhône).

ANGOT (**Charles-Alfred**), Météorologiste titulaire au Bureau central météorologique, Professeur à l'Institut national agronomique, 12, avenue de l'Alma. Paris, 8e.

ANTONAY (**Léon d'**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Expert près le Tribunal civil, 41, rue d'Assas. Paris, 6e.

APOIL, Censeur de l'Ecole de la Manufacture de Sèvres, 14, rue de Brancas, à Sèvres (Seine-et-Oise).

APPELL, Membre de l'Institut, Doyen de la Faculté des Sciences, 17, rue Bonaparte. Paris.

MM.

APPERT (**Louis**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur verrier, 50, rue de Londres. Paris, 8e.

ARGYROPOULOS, Recteur de l'Université, à Athènes (Grèce).

ARGYROPOULOS (**Tassos D.**), Chimiste-Bactériologiste, à Smyrne (Turquie d'Asie).

ARIÈS (**Emmanuel**), Lieutenant-Colonel du Génie en retraite, 9, boulevard du Roi, à Versailles (Seine-et-Oise).

ARMAGNAT, Ingénieur, 20, rue Delambre. Paris, 14e.

ARMET (**Louis**), Capitaine du Génie, ancien Élève de l'Ecole Polytechnique, 18, cours Lieutaud, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

ARNOUX (**René**), Ingénieur civil, 45, rue du Ranelagh. Paris, 16e.

ARSONVAL (Dr **d'**), Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France, 12, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

ARTH, Chargé d'un Cours de Chimie industrielle à la Faculté des Sciences, 7, rue de Rigny, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

ARTHAUD (Dr), Chef des travaux histologiques au Laboratoire de Physiologie générale du Muséum, 40, rue Denfert-Rochereau. Paris, 5e.

ASSIER DE POMPIGNAN, Lieutenant de vaisseau, Attaché au Service hydrographique de la Marine, 13, rue de l'Université. Paris, 7e.

AUBERT (**Auguste**), Professeur au Lycée de Toulouse (Haute-Garonne).

AUBERT, Professeur au Lycée Condorcet, 13, rue Bernoulli. Paris, 8e.

AUBERT (**Paul**), Professeur au Lycée Charlemagne, 11, rue de la Croix, à Nogent-sur-Marne.

AUBRY (**Alfred-Joseph**), Professeur au Lycée de Saint-Étienne (Loire).

AUDINOS (**Jacques-Marcellin**), Professeur au Lycée de Tournon (Ardèche).

AUGÉ, Docteur en Médecine, 16, boulevard de la Gare, à Narbonne (Aude).

AUPAIX (**Charles**), Professeur au Lycée, 8, place Saint-Hilaire, à Niort (Deux-Sèvres).

AYET (**l'abbé**), Professeur de Mathématiques à l'École Fénelon, à Bar-le-Duc (Meuse).

BABINSKI (**Henri**), Ingénieur civil des Mines, 170 *bis*, boulevard Haussmann. Paris, 8e.

BABLON, 42, rue Boulard. Paris, 14e.

BACHELIER (**Gustave**), Chargé de Cours, 8, rue Geoffroy-de-Montbray, à Coutances (Manche).

BADONNEL (**Marie-Gabriel-Victor**), Professeur au Lycée, 2, square Castan, à Besançon (Doubs).

BAGARD (**H**), Professeur à la Faculté des Sciences, 3, rue du Docteur-Bally, à Grenoble (Isère).

BAILLAUD (**B.**), Doyen honoraire de la Faculté des Sciences, Directeur de l'Observatoire de Toulouse (Haute-Garonne).

BAILLAUD (**Jules**), Astronome adjoint à l'Observatoire, 148, boulevard Montparnasse. Paris, 14e.

MM.

BAILLE (**J.-B.**), Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles, 26, rue Oberkampf. Paris, 11e.

BARBASTE (**Antoine**), Licencié ès sciences physiques, à Antrain-sur-Couesnon (Ille-et-Vilaine).

BARBÉ (Dr), 54, rue Cazault, à Alençon (Orne).

BARBILLION (**Louis**), Professeur de Physique industrielle à la Faculté des Sciences, Directeur de l'Institut électrotechnique, 9, rue Villars, à Grenoble (Isère).

BARDET (**G.**), Dr, Secrétaire général de la Société de Thérapeutique, 21, rue du Cherche-Midi. Paris, 6e.

BARDY (**Charles**), Directeur honoraire du Service scientifique des Contributions indirectes, 30, rue de Miromesnil. Paris, 8e.

BARNES (**Howard-Turner**), Doctor of Science, Assistant Professor of Physics, Dept. of Physics, Mc Gill University, Montreal (Canada).

BARRÉ (**Eugène**), Lieutenant du Génie, détaché à l'État-Major particulier de l'Armée, à Verdun (Meuse).

BARRET (**G.**), Docteur en Médecine, 1, rue Lavoisier. Paris, 8e.

BARTH (**Johann-Ambrosius**), Libraire, Rossplatz, 17, à Leipzig (Allemagne).

BARUS (**Carl**), Professeur de Physique, Brown University, Providence, R. I. (U. S. A.).

BARY (**Paul**), Ingénr électricien, 85, avenue de Neuilly, à Neuilly-sur-Seine.

BASSAC, Professeur au Lycée de Marseille (Bouches-du-Rhône).

BASSÉE (**Jules-Charles**), Constructeur d'instruments de Physique, 4, avenue de la Dame-Blanche, à Fontenay-sous-Bois (Seine).

BASSET (**Alphonse**), Professeur au Lycée de Bourges (Cher).

BASSOT (le Général), Membre de l'Institut, Directeur de l'Observatoire de Nice (Alpes-Maritimes).

BATTELLI (**Angelo**), Professeur à l'Université de Pise (Italie).

BAUD (**Félix**), Professeur au Collège d'Ajaccio (Corse).

BAUDEUF-BAYARD (Mme **Henriette**), Professeur au Lycée de Jeunes filles, 97, rue Bègles, à Bordeaux (Gironde).

BAUER (**Edmond**), 9, avenue d'Eylau. Paris, 16e.

BAUME-PLUVINEL (Comte **Aymar de la**), 7, rue de la Baume. Paris, 7e.

BAUMGART (**Ch.**), Agrégé de l'Université, rue Zawodskaya, 8, Log. 2, à Saint-Pétersbourg (Russie).

BEAULARD (**Fernand**), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, Université de Montpellier, 41, boulevard des Arceaux, à Montpellier (Hérault).

BECKER, Préparateur au Collège Rollin, avenue Trudaine. Paris, 9e.

BECLÈRE (Dr **Antoine**), Médecin de l'Hôpital Saint-Antoine, 122, rue de la Boëtie. Paris, 8e.

BÉCORDEL (**H. de**), Receveur principal, à Grasse (Alpes-Maritimes).

BECQUEREL (**Henri**), Membre de l'Institut, Professeur à l'École Polytechnique, 6, rue Dumont-d'Urville. Paris, 16e.

BECQUEREL (**Jean**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Assistant au Muséum, 88, boulevard Péreire. Paris, 16e.

MM.

BÉDART, Professeur agrégé de Physiologie à la Faculté de Médecine, 15, rue Masséna, à Lille (Nord).

BÉDOREZ, Inspecteur d'Académie, Directeur de l'Enseignement primaire du département de la Seine, 21, quai de Montebello. Paris.

BÉGHIN (**Auguste**), Professeur à l'École nationale des Arts industriels, Directeur du Laboratoire municipal, 30, rue Saint-Antoine, à Roubaix (Nord).

BÉGIN (l'abbé **Pierre-Achille**), Professeur au Séminaire Saint-Charles-Borromée, à Sherbrooke (Canada).

BEL (**Edgar**), Professeur au Lycée d'Oran (Algérie).

BÉLIN (**Édouard**), Administrateur de la Société des Imprimeries réunies, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

BELL (**Alexander-Graham**), 1331, Connecticut Ave., Washington, D. C. (U. S. A.).

BELLATI (**Manfredo**), Professeur de Physique technique à l'École des Ingénieurs, à l'Université de Padoue (Italie).

BELOT (Dr), 36, rue de Bellechasse. Paris. 7e.

BÉNARD (**Henri**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 35 *bis*, rue de Condé, à Lyon (Rhône). *

BENNDORF (Dr **Hans**), Professeur à l'Université, Institut de Physique, à Gratz (Autriche).

BENOIST (**Louis**), Profesr au Lycée Henri IV, 26, rue des Écoles. Paris, 5e.

BENOIT (Dr **René**), Correspondant de l'Institut, Directeur du Bureau international des Poids et Mesures, au pavillon de Breteuil, Sèvres (Seine-et-Oise).

BERG (**Max**), Ingénieur de la Maison Krauss, 21, rue Albouy. Paris, 10e.

BERGÉ (**Eugène**), Professeur au Collège, 10, avenue Voltaire, à Lunéville (Meurthe-et-Moselle).

BERGER (Dr **Émile**), Membre correspondant des Académies Royales de Médecine de Belgique et de Madrid, 3, rue Anatole-de-la-Forge. Paris, 17e.

BERGERON (**Louis**), Ingénieur-Électricien, maison Farcot frères et Cie (Saint-Ouen), 1, rue Villeneuve, à Clichy (Seine).

BERGON, Directeur au Ministère des Postes et Télégraphes, 9, rue de Condé. Paris, 6e.

BERGONIÉ (Dr), Professeur de Physique à la Faculté de Médecine, 6 *bis*, rue du Temple, à Bordeaux (Gironde).

BERGONIER (**G.**), Docteur en Médecine, à Barsac (Gironde).

BERLEMONT, Constructeur d'instruments de précision, 11, rue Cujas. Paris, 5e.

BERNARD (**Alfred**), Professeur en retraite, 16, rue Héliot, à Toulouse (Haute-Garonne).

BERNARD (**Louis**), Profesr au Lycée, 21, rue Saint-Éloi, à Orléans (Loiret).

BERNARD, Professeur au Collège d'Apt (Vaucluse).

BERNOULLI (**Auguste-Léonard**), Assistant au Laboratoire de Physique de l'Ecole Polytechnique, 13, Theaterplatz, à Aix-la-Chapelle (Allemagne).

BERNOUILLI (Dr **Rud.**), Spichernstrasse, 78, à Cologne (Allemagne).

BERSON, Professeur au Lycée Condorcet, 5, place de Jussieu. Paris, 5e.

MM.

BERTHELOT, Sénateur, Membre de l'Académie Française, Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, 3, rue Mazarine. Paris, 6e.

BERTHELOT (**Daniel**), Docteur ès sciences, Professeur à l'École supérieure de Pharmacie, 3, rue Mazarine. Paris, 6e.

BERTHON (**Louis-Alfred**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Administrateur de la Société industrielle des Téléphones, 51, rue de la Chaussée-d'Antin. Paris, 9e.

BERTIN, Membre de l'Institut, Directeur des Constructions navales au Ministère de la Marine, 8, rue Garancière. Paris, 6e.

BERTIN-SANS (Dr **Henri**), Professeur à la Faculté de Médecine, 3, rue de la Merci, à Montpellier (Hérault).

BERTOUX, Professeur au Lycée de Lille (Nord).

BESOMBES (**Noël**), Directeur des Postes et des Télégraphes, 33, boulevard National, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

BESSON (**Charles-Ernest-Augustin**), Profr au Collège de Saint-Dié (Vosges).

BESSON (**Léon**), Ancien Officier de Marine, Chef de l'Agence à la Compagnie générale transatlantique, à Alger (Algérie).

BESSON (**Louis**), Sous-Chef à l'Observatoire de Montsouris. Paris.

BESSON, Ingénieur des Arts et Manufactures, Administrateur-délégué de la Société centrale de Produits chimiques, 44, rue des Écoles. Paris, 5e.

BÉTOUX (**Victor**), Professeur au Lycée, 22, boulevard Saint-André, à Beauvais (Oise).

BIAIS (Dr), Professeur à l'École de médecine de Limoges (Haute-Vienne).

BIBLIOTHÈQUE DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES.

BIBLIOTHÈQUE DE L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON.

BIBLIOTHÈQUE DES FACULTÉS DE CAEN.

BIBLIOTHÈQUE DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE.

BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE DE LILLE.

BIBLIOTHÈQUE DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE.

BIBLIOTHÈQUE ROYALE DE BERLIN.

BIED (**Jules**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, Directeur du Laboratoire de la Société J. et A. Pavin de Lafarge, Le Teil (Ardèche).

BIENAYMÉ (**A.-F.-A.**), Inspecteur général du Génie maritime, en retraite, Correspondant de l'Institut, 14, rue du Revel, à Toulon (Var).

BIERNACKI, Professeur de Physique à l'École Polytechnique, Institut de Physique de l'École Polytechnique de Varsovie (Russie).

BIGET (**Albert**), Percepr des Contributions directes, à Bologne (Haute-Marne).

BILLARD (**Manuel-Jacques-Camille**), Professeur au Lycée Charlemagne, 10, boulevard Saint-Marcel. Paris, 5e.

BING, Docteur en médecine, 15, rue Pajou prolongée. Paris, 16e.

BIRHANS (**Nicolas-Flavien**), Préparateur au Lycée Henri-IV, 32, avenue des Charmes, à Vincennes (Seine).

BIRKELAND (**Kristian**), Professeur à l'Université de Christiania (Norvège).

BISCHOFFSHEIM (**Raphaël-Louis**), Membre de l'Institut, 3, rue Taitbout. Paris, 9e.

MM.

BJERKNES (**Vilhelm**), Chargé de Cours à l'Université de Stockholm (Suède).

BLANC (**Auguste**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Rennes (Ille-et-Vilaine).

BLANC (**Gian Alberto**), Docteur ès Sciences, Institut de Physique, via Panisperna, à Rome (Italie).

BLAREZ (le Dr), Professeur à la Faculté de Médecine et de Pharmacie, 3, rue Gouvion. à Bordeaux (Gironde).

BLASERNA (**P.**), Sénateur, Professeur à l'Université, R. Instituto fisico, via Pianisperna, à Rome (Italie).

BLEIN (**Jean**), Professeur au Lycée, 160, rue Laurendeau, à Amiens (Somme).

BLOCH (**Salvador**), Profr au Lycée St-Louis, 13, rue de l'Estrapade. Paris, 5e.

BLOCH (**Eugène**), Agrégé, Docteur ès sciences, 18, rue de l'Odéon. Paris, 6e.

BLOCH (**Moïse**), Professeur au Lycée de Belfort (Territoire de Belfort).

BLONAY (**Roger de**), 23, rue de La Rochefoucauld. Paris, 9e.

BLONDEL, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur à l'École des Ponts et Chaussées, 41, avenue de la Bourdonnais. Paris, 7e.

BLONDIN (**Joseph**), Professeur au Collège Rollin, Directeur technique au journal *La Revue Électrique*, 171, rue du Faubourg-Poissonnière. Paris, 9e.

BLONDLOT (**R.**), Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 8, quai Claude-le-Lorrain, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

BLUMBACH (**Theodor**), Membre de la Chambre centrale des Poids et Mesures de l'Empire de Russie, Perspective de Zabalkousky, à Saint-Pétersbourg (Russie).

BOBERIL (le Vicomte **Roger de**), rue d'Orléans, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

BOBYLEFF, Profr de Mécanique à l'Université de Saint-Pétersbourg (Russie).

BOCAT (l'abbé), Licencié ès sciences physiques, Professeur au Collège Saint-François-de-Sales, rue Vannerie, à Dijon (Côte-d'Or).

BODOLA de ZAGON (**Louis**), Professeur de Géodésie à l'École Polytechnique, VII Damjanich, Budapest (Hongrie).

BOIS (Dr **E.-H. du**), Professeur à l'Université, Hervartstrasse, 21, à Berlin N. W. (Allemagne).

BOISARD (**Louis**), Profr au Lycée Carnot, 129, avenue de Wagram. Paris, 17e.

BOITEL (**Louis-Albert**), Professeur au Lycée Lakanal, 4, rue Houdan, à Sceaux (Seine).

BOIZARD, Agrégé, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences, 21, rue Cail. Paris, 10e.

BONACINI (Dr **Carlo**), Professeur de Physique au « R. Liceo Muratori », à Modène (Italie).

BONAPARTE (Prince **Roland**), 10, avenue d'Iéna. Paris, 16e.

BONGIOVANNI (**Joseph**), Professeur de Physique à l'Université Farrara (Italie).

BORDÉ (**Paul**), Ingénieur opticien, 29, boulevard Haussmann. Paris, 9e.

BORDENAVE (**L.**), Ingr à l'usine Ménier, à Noisiel-sur-Marne (Seine-et-Marne).

BORDET (**Lucien**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, ancien Inspecteur des Finances, Administrateur de la Compagnie des forges de Châtillon et Commentry, 181, boulevard Saint-Germain. Paris, 6e.

MM.

BORDIER (Dr **Henri**), Professeur, Agrégé de la Faculté de Médecine, 7, rue Grolée, à Lyon (Rhône).

BORGMANN (**J.-J**), Professeur à l'Université de Saint-Pétersbourg (Russie).

BOSE (**Jagadis, Chunder**), Presidency College, à Calcutta (Indes anglaises).

BOSLER (**Jean**), ancien Élève de l'École Polytechnique, Licencié ès Sciences, 5, rue du Faubourg-Saint-Jacques. Paris, 15e.

BOUASSE (**Henri**), Professeur à la Faculté des Sciences, rue du Japon, à Toulouse (Haute-Garonne).

BOUCHARD (Dr), Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté de Médecine. 174, rue de Rivoli. Paris, 1er.

BOUCHER (**Anthelme**), Ingénieur à Prilly, canton de Vaud (Suisse).

BOUCHEROT (**Paul**), Ingénieur Conseil, 14, rue Daumier. Paris, 16e.

BOUDIN, Professeur au Collège de Normandie, à Clères (Seine-Inférieure).

BOUDREAUX (**Léon**), Propriétaire et Directeur des Ateliers de Galvanoplastie, 8, rue Hautefeuille. Paris, 6e.

BOUDRET (**Eugène**), Profr au Lycée Janson-de-Sailly, 39, rue Vital. Paris, 16e.

BOUÉ (Mlle **Marie**), Professeur au Lycée de Jeunes Filles, 17, rue de la Paix. Le Havre (Seine-Inférieure).

BOUIC, Professeur de Mathématiques au Lycée, 27, rue Saint-Léonard, à Angers (Maine-et-Loire).

BOULANGER (**Julien**), Lieutenant-Colonel du Génie, Directeur des Services de la Télégraphie militaire et du Matériel de Guerrre du Génie, 2, rue Lecourbe. Paris, 15e.

BOULÉ (**Auguste**), Inspecteur général des Ponts et Chaussées en retraite, 7, rue Washington. Paris, 8e.

BOULGAKOFF, Privat docent à l'Université de Saint-Pétersbourg (Russie).

BOULLAY, Professeur au Lycée de Bordeaux (Gironde).

BOULOUCH (**R.**), Professeur au Lycée de Bordeaux (Gironde).

BOURGAREL (**Paul**), Professeur au Lycée Carnot, 145, boulevard Malesherbes. Paris, 17e.

BOURGEOIS (**Léon**), Docteur ès sciences, Répétiteur à l'École Polytechnique. 1, boulevard Henri-IV. Paris, 4e.

BOURGEOIS (**Robert**), Lieutenant-Colonel, Chef de la Section de Géodésie au Service Géographique de l'armée, 140, rue de Grenelle. Paris, 7e.

BOURGET (**Henry**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, Astronome adjoint à l'Observatoire, 20, rue Saint-Jacques, Toulouse (Haute-Garonne).

BOUTY (**E.**), Professeur à la Faculté des Sciences, 5, rue du Faubourg-Saint-Jacques. Paris, 14e.

BOYER (**Maurice-Gaston**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 28, place de l'Hôtel-de-Ville, Le Havre (Seine-Inférieure).

BRANLY (**E.**), Professeur à l'École libre des Hautes-Études scientifiques et littéraires, 21, avenue de Tourville. Paris, 7e.

BREWER (**William-J.**), Constructeur d'instruments pour les Sciences, 76, boulevard Saint-Germain. Paris, 5e.

BRIEU (Mme), à Saint-Céré (Lot).

MM.

BRILLOUIN (**Marcel**), Professeur au Collège de France, 31, boulevard de Port-Royal. Paris, 13e.

BRIMER (**Émile**), Docteur ès Sciences, Privat-docent à l'Université, 11, quai des Bergues, à Genève (Suisse).

BRISAC, Ingénieur de l'éclairage à la Compagnie parisienne du Gaz, 58, rue de Châteaudun. Paris, 9e.

BRISSONNET (**Jules-Georges-Clément**), Professeur suppléant aux Écoles de Médecine et de Pharmacie, 141, rue de la Tour. Paris, 16e.

BROCA (Dr **André**), Répétiteur à l'École Polytechnique, Professeur agrégé de Physique à la Faculté de Médecine, 7, cité Vaneau. Paris, 7e.

BROCQ (**F.**), Ingénieur en chef à la Compagnie des Compteurs, 185, rue de Vaugirard. Paris, 15e.

BROGLIE (**M. de**), Enseigne de vaisseau, 29, rue Chateaubriand. Paris, 8e.

BROWNE (**H.-V.**), Directeur de la Compagnie Direct Spanish Telegraph, à Barcelone (Espagne).

BRUNEL, Capitaine d'Artillerie à la Commission Centrale de réception des Poudres, à Versailles (Seine-et-Oise).

BRUNET (**Maurice**), Professeur au Lycée de Carcassonne (Aude).

BRUNHES (**Bernard**), Professeur à la Faculté des Sciences, Directeur de l'Observatoire du Puy de Dôme, 37, rue Montlosier, à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

BRUNSWICK, Ingénieur principal, Chef du Service technique de la maison Bréguet, 1, rue Alphonse-Daudet, Paris.

BRYLINSKI (**Émile**), Sous-Directeur du *Triphasé*, 5, avenue Teissonnière, à Asnières (Seine).

BUCHERER (**Alfred**), Dr. Phil. Privat Docent de Physique à l'Université, 61, Königstrasse, à Bonn (Allemagne).

BUDDE (Dr **E.**), Professeur, Berlinerstrasse, 54, à Charlottenburg (Allemagne).

BUGUET (**Abel**), Professeur au Lycée, à l'École des Sciences et à l'École de Médecine, 14, rue des Carmes, à Rouen (Seine-Inférieure).

BUISSON (**Henri**), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Marseille (Bouches-du-Rhône).

CABRAL (**Paul-Benjamin**), Ingénieur civil, Professeur d'Électrochimie, Inspecteur général des Télégraphes et des Industries électriques, Directeur des Ateliers du Ministère des Travaux publics de Portugal, R. do Duque de Bragança, 20, à Lisbonne (Portugal).

CADÉMARTORY (**Léon**), Ingénieur de la Marine, 2, rue Revel, à Toulon (Var).

CADOT (**Albert**), Professeur au Lycée Carnot, 13, rue de Montmorency, à Boulogne-sur-Seine.

CAILHO, Ingénieur des Télégraphes, 111, rue Mozart. Paris, 16e.

CAILLETET (**L.-P.**), Membre de l'Institut, 75, boulevard Saint-Michel. Paris, 5e.

MM.

CALMETTE (**Louis**), Professeur au Prytanée militaire, 7, boulevard d'Alger, à la Flèche (Sarthe).

CAMBOULAS, Ingénieur des Arts et Manufactures, à Saint-Geniès-d'Olt (Aveyron).

CAMICHEL (**Ch.**), Professeur à la Faculté des Sciences, 11, rue Bayard, à Toulouse (Haute-Garonne).

CAMPANILLE (**Filippo**), Dr, Professeur à l'École supérieure d'Agriculture, Mondragone, 24, à Portici (Italie).

CANCE (**Alexis**), Ingénr électricien, 5, rue Saint-Vincent-de-Paul. Paris, 10e.

CANET (**Gustave-Adolphe**), Directeur de l'Artillerie de MM. Schneider et Cie, 87, avenue Henri-Martin. Paris, 16e.

CAPELLE (**Édouard**), 13, rue Peyras, à Toulouse (Haute-Garonne).

CARALP (**Pierre**), Professeur au Lycée, maison Longe, allée de Villote, à Foix (Ariège).

CARIMEY, Profesr au Lycée Saint-Louis, 63, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

CARLIER (**Joseph**), Ingénieur, attaché au Service électrique des Chemins de fer de l'État Belge, 16, rue Destouvelles, à Bruxelles (Belgique).

CARON (Mlle), Directrice du Lycée de Jeunes filles de Laval (Mayenne).

CARPENTIER (**Jules**), Ingénieur-Constructeur, Membre du Bureau des Longitudes, 34, rue du Luxembourg. Paris, 6e.

CARPENTIER (**Jean**), 34, rue du Luxembourg. Paris, 6e.

CARRÉ (**F.**), Professeur au Lycée Janson-de-Sailly, 127 *bis*, rue du Ranelagh. Paris, 16e.

CARVALLO (**E.**), Examinateur des élèves à l'École Polytechnique, 1, rue Clovis. Paris, 5e.

CASPARI (**E.**), Ingénieur hydrographe de la Marine, Répétiteur à l'École Polytechnique, 30, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

CASSAN (Dr **Antony**), Médecin électricien, 5, rue des Pénitents, à Nantes (Loire-Inférieure).

CASSIE (**William**), Professor of Physics Brantwood, Englefield Green, Surrey (Angleterre).

CASTAING-ALFARO (**Louis**), Juge en premier ressort au Criminel du département d'Alajuela (Costa-Rica), Membre de la Société de Photographie, 67, calle de Guardia, Alajuela (République de Costa-Rica).

CASTEX (**Edmond**), Professeur à l'École de Médecine de Rennes, 11, rue Kléber, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

CATHIARD (**André-Georges-Marcel**), Élève à l'École supérieure d'Électricité, 19, rue Singer. Paris, 16e.

CAUSSE, Professeur au Collège de Brive (Corrèze).

CAVIALE (**V.**), Directeur de l'Institution Bertrand, 52, avenue de Saint-Cloud, à Versailles (Seine-et-Oise).

CAZES (**Laurent**), Répétiteur général au Lycée Saint-Louis, 44, boulevard Saint-Michel. Paris, 6e.

CHABAUD (**Victor**), Constructeur d'instruments de précision, 58, rue Monsieur-le-Prince. Paris, 6e.

MM.

CHABERT (**Léon**), Ingénieur électricien, 8, rue Picot. Paris, 16e.

CHABRERIE, Principal du Collège de Treignac, à Sarran par Corrèze (Corrèze).

CHABRIÉ (**Camille**), Docteur ès sciences, Sous-Directeur du Laboratoire d'enseignement pratique de Chimie appliquée, 83, rue Denfert-Rochereau. Paris, 14e.

CHAIR, Professeur au lycée, 9, rue Cassotte, à Besançon (Doubs).

CHAIRY, Professeur au Lycée Janson-de-Sailly, 60, rue du Ranelagh. Paris, 16e.

CHAMPIGNY (**A.**), ancien élève de l'École Polytechnique, Ingénieur civil des Mines, 11, rue de Berne. Paris, 8e.

CHANCEL (**Félix**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 34, rue Saint-Jacques, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

CHANOZ (Dr), Chef des travaux pratiques de Physique à la Faculté de Médecine de Lyon (Rhône).

CHAPPUIS (**James**), Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, 5, rue des Beaux-Arts. Paris, 6e.

CHAPPUIS (**Pierre**), Sevogelstrasse, 34, à Bâle (Suisse).

CHARDONNET (le comte **de**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, 43, rue Cambon. Paris, 1er.

CHARLE (**Henri**), Professeur au Lycée, 6, rue de l'Entrepôt, à Belfort (Territoire de Belfort).

CHARPENTIER (Dr **A.**), Professeur à la Faculté de Médecine, 31, rue Claudot, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

CHARPY (**G.**), Docteur ès sciences, 27, av. de la Gare, Montluçon (Allier).

CHASSAGNY (**Michel**), Professeur au Lycée Janson-de-Sailly, 29, rue Davioud. Paris, 16e.

CHASSY, Professeur à la Faculté libre des sciences, à Lyon (Rhône).

CHATEAU (**C.**), ancien Élève de l'École Polytechnique, Constructeur d'instruments de précision, 7, rue Talma. Paris, 16e.

CHATELAIN (**Michel de**), Professeur de Physique à l'École supérieure des Mines, à Saint-Pétersbourg (Russie).

CHAUMAT (**Henri**), Sous-Directeur de l'École supérieure d'Électricité, 26, rue Ernest-Renan. Paris, 15e.

CHAUSSEGROS, Ingénieur, Chef de traction au Chemin de fer, 3, place Jussieu. Paris, 5e.

CHAUVEAU, Membre de l'Institut, 4, rue du Cloître-Notre-Dame, Paris.

CHAUVEAU, Ancien Élève de l'École Normale supérieure, Météorologiste adjoint au Bureau central, 51, rue de Lille. Paris, 7e.

CHAUVIN (**Raphaël**), Ingénieur électricien, 186, rue Championnet. Paris, 18e.

CHAVES (**Antonio Ribeiro**), 116, rua do Ouvidor, à Rio de Janeiro (Brésil).

CHENEVEAU (**C.**), Préparateur à la Faculté des Sciences, 229, rue du Faubourg-Saint-Honoré. Paris, 8e.

CHEER, Professeur, 66, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

CHEVALLIER (**Henry**), Docteur ès sciences, Sous-Directeur du Laboratoire d'Électricité industrielle, 8, rue Villedieu, à Bordeaux (Gironde).

MM.

CHIPART, Ingén^r des Mines, 15, rue de la Franchise, à Bordeaux (Gironde).

CHISTONI (**Ciro**), Professeur à l'Université de Modène (Italie).

CHOMAT (l'abbé **Pierre**), Licencié ès Sciences, 8, rue Gît-le-Cœur. Paris, 6e.

CHRÉTIEN (**Arthur-Louis-Camille**), Profes. au Lycée de Cherbourg (Manche).

CHRÉTIEN (**E.**), Professeur au Lycée, 6, rue Jules-Simon, à Saint-Brieuc (Côtes-du-Nord).

CHUITON (D^r^), 2, rue de la Mairie, à Brest (Finistère).

CHWOLSON (**Oreste**), Professeur à l'Université Impériale, Wassili Ostrow, 8 ligne, Maison n° 19, Log. n° 5, à Saint-Pétersbourg (Russie).

CIRERA (**Rév. P.**), ancien chef du Service Magnétique à l'Observatoire de Manille, Direct^r^-fondat^r^ de l'Observatoire de l'Èbre, à Tortosa (Espagne).

CLAUDE (**Ernesto**), Ingénieur à Léon (Espagne).

CLAUDE (**Georges**), 43, rue Saint-Lazare. Paris, 9e.

CLAVEAU, Professeur au Lycée de Lyon (Rhône).

CLAVERIE, Censeur du Lycée Condorcet, 65, rue Caumartin. Paris, 9e.

CLÉMENT (**Louis**), 18, rue Louis-le-Grand. Paris, 2e.

CLOAREC, Chef des Travaux pratiques de Physique, à la Faculté des Sciences, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

CLUZET, Professeur agrégé de Physique à la Faculté de Médecine, 45, rue de Metz, à Toulouse (Haute-Garonne).

COCHET (**Léon**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Directeur de la Société d'Eaux et d'Éclairage du Var, à Grimaud (Var).

COGIT, Constr^r^ d'appareils pour les Sciences, 49, boul. St-Michel. Paris, 8e.

COGNET (**Alfred**), Prof^r^ au Collège, avenue de la Gare, à Bergerac (Dordogne).

COLARDEAU (**P.**), Professeur au Lycée de Lille (Nord).

COLARDEAU (**Emmanuel**), Professeur au Collège Rollin, 13, rue de Navarin. Paris, 9e.

COLIN (**Th.**), Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 6, rue Victor-Considérant. Paris, 14e.

COLLANGETTES (R. P.), Prof^r^ à l'Université St-Joseph, à Beyrouth (Syrie).

COLLIGNON (**Benoît**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, Professeur de Mathématiques, 74, rue Jean-Jacques-Rousseau, à Dijon (Côte-d'Or).

COLLOT (**Armand**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Constructeur d'instruments de précision, 8, boulevard Edgar-Quinet. Paris, 14e.

COLNET D'HUART (**François de**), Docteur ès sciences, Professeur à l'Athénée, avenue Reinsheim, à Luxembourg (Grand-Duché de Luxembourg).

COLOMAN DE SZILY, Akademia utexa, 2, à Budapest (Hongrie).

COLSON (**Albert**), Professeur de Chimie à l'École Polytechnique, 47, rue de Vaugirard. Paris, 6e.

COLUMBIA UNIVERSITY LIBRARY, à New-York (États-Unis), chez M. Stechert, 76, rue de Rennes. Paris, 6e.

COMBES (**Charles**), ancien élève de l'École Polytechnique, 29, avenue Rapp. Paris, 7e.

COMBET (**Candide**), Prof^r^ au Lycée de Tunis, quartier Sans-Soucis (Tunisie).

COMMANAY, Professeur au Lycée de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

MM.

COMPAGNIE DES CHEMINS DE FER DU MIDI, 54, boulevard Haussmann. Paris, 9e.

COMPAGNIE DES SALINS DU MIDI, 94, rue de la Victoire. Paris, 9e.

COMPAIN (l'Abbé), Professeur de Sciences à l'École Fénelon, à Bar-le-Duc (Meuse).

COOPER (**W.-R.**), Honorary Secretary Physical Society of London, Member of Institution Electrical Engineers, 82, Victoria St. Westminster, Londres (Angleterre).

COPPET (**de**), villa de Coppet, rue Magnan, à Nice (Alpes-Maritimes).

CORNAILLE (**Édouard-Félicien**), Professeur au Collège, 1, rue des Écoles, à Arras (Pas-de-Calais).

CORVISY (**A.**), Profr au Lycée, 6, rue St-Benoît, à Limoges (Haute-Vienne).

CORVISY (**Didier**), Étudiant en Médecine, 6. rue Saint-Benoît, à Limoges (Haute-Vienne).

COSSERAT (**Eugène-Maurice-Pierre**), Professeur à la Faculté des Sciences, 1, rue de Metz, à Toulouse (Haute-Garonne).

COSSERAT (**François**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 36, avenue de l'Observatoire. Paris, 14e.

COSTA (Dr), Professeur à la Faculté de Médecine, Calle Vittoria, 1094, Buenos-Ayres (République Argentine).

COTTON (**A.**), Maître de Conférences à l'École Normale supérieure, 49, rue Saint-André-des-Arts. Paris, 6e.

COUDERT (**A.**), Professeur au Lycée d'Amiens (Somme).

COUDRY (**Eugène**), Professeur au Lycée, 6, rue de l'Héritan, à Mâcon (Saône-et-Loire).

COUETTE (**Maurice**), Docteur ès sciences, Professeur de Physique aux Facultés Catholiques, 26, rue de la Fontaine, à Angers (Maine-et-Loire).

COUPIER, à Saint-Denis-Hors, par Amboise (Indre-et-Loire).

COURQUIN (l'abbé), Professeur à l'École industrielle, 70, rue du Casino, à Tourcoing (Nord).

COURTOIS (l'abbé **F.**), Missionnaire, Église St-Joseph, à Chang-Haï (Chine).

CRÉMIEU (**Victor**), Docteur ès sciences physiques, 6, rue d'Ulm. Paris, 5e.

CROIX (**Victor**), Professeur au Collège communal, place de l'Église, à Saint-Amand-les-Eaux (Nord).

CROVA, Correspondant de l'Institut, Directeur de l'Institut de Physique de l'Université de Montpellier (Hérault).

CUÉNOD, Ingénieur électricien, 12, rue Diday, à Genève (Suisse).

CULMANN (**Paul**), Docteur ès sciences, Collaborateur scientifique de la maison Zeiss, 28, rue Vauquelin. Paris, 5e.

CURCHOD (**A.**), Licencié ès sciences, 26, rue de la République, à Orléans (Loiret).

CURIE (**Mme SKLODOWSKA**), Docteur ès sciences, Professeur à l'École Normale supérieure d'Enseignement secondaire pour les Jeunes filles, 108, boulevard Kellermann. Paris, 13e.

CURIE (**Pierre**), Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 108, boulevard Kellermann. Paris, 13e.

MM.

DAMBIER, Professeur au Collège Stanislas, 44, rue de Fleurus. Paris, 6e.

DAMIEN (**B.-C.**), Doyen de la Faculté des Sciences, 74, rue Brûle-Maison, Lille (Nord).

DANIEL (**Jacques**), Ingénieur, Directeur spécial de l'Université, 1. rue de la Prévôté, à Bruxelles (Belgique).

DANNE (**Jacques**). Préparateur à la Faculté des Sciences, 91. rue Denfert-Rochereau. Paris, 14e.

DARMON, Professeur au Prytanée militaire de La Flèche (Sarthe).

DARZENS, Répétiteur à l'École Polytechnique, 22, avenue Ledru-Rollin. Paris, 12e.

DAUJAT (**Michel-Alexandre**), Professeur à l'École Normale, 77, boulevard Georges-Sand, à Châteauroux (Indre).

DAUVÉ (**Camille-Albert**), Professeur de Physique au Collège Monge, à Beaune (Côte-d'Or).

DAUZÈRE (**Jean-Camille**), Professeur au Lycée, rue de Rome, à Agen (Lot-et-Garonne).

DEBIERNE, 18, rue des Grands-Augustins, Paris, 6e.

DECHEVRENS (le R. P. **Marc**), S. J., Ancien Directeur de l'observatoire Zi-Ka-Wei (Chine), à Saint-Hélier, observatoire Saint-Louis (Ile Jersey).

DÉCOMBE (**Louis**), Docteur ès sciences, impasse Reille. Paris, 14e.

DEDET (**François**), Professeur honoraire de Physique, à Albi (Tarn-et-Garonne).

DEFFORGES (le Général **G.**), Commandant la 78e Brigade, villa Saint-Michel, à Toul (Meurthe-et-Moselle).

DELAUNAY (**Nicolas**), Professeur de Mécanique à l'Institut d'Agriculture à Novo-Alexandria, gouvernement de Lublin (Russie).

DÉLCOULX (**Henri**), Professeur au Collège de Dunkerque (Nord).

DELEBECQUE, Ingénieur des Ponts et Chaussées, à Thonon (Haute-Savoie).

DELEMER (**Jules-Jean-Baptiste**), Docteur ès sciences, Professeur aux Facultés catholiques, 24, rue de Voltaire, à Lille (Nord).

DELEVEAU, Professeur au Lycée, à Niort (Deux-Sèvres).

DELPEUCH, Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur aux Chemins de fer de l'Est, 53, rue de Maubeuge. Paris, 9e.

DELSOL (**Étienne**), Ingénieur civil, ancien Élève de l'École Polytechnique, 4, rue de Berne. Paris.

DELVALEZ (**G.**), Professeur au Lycée Condorcet, 16, avenue Ledru-Rollin. Paris, 12e.

DEMERLIAC (**R.**), Professeur à l'École de Médecine, 3 *bis*, rue aux Juifs, à Caen (Calvados).

DEMICHEL (**A.**), Constructeur d'instruments pour les Sciences, 38, rue de Sévigné. Paris, 4e.

DÉPOT CENTRAL DE LA TÉLÉGRAPHIE MILITAIRE, 51, boulevard de La Tour-Maubourg. Paris, 7e.

DEPREZ (**Marcel**), Membre de l'Institut, Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers, 23, avenue Marigny, à Vincennes (Seine).

MM.

DERO (**Louis-Émile-Léonce**), Ingénieur civil, 101, rue Tourneville, Le Havre (Seine-Inférieure).

DERVIEUX (**Albert**), Professeur au Collège, rue Notre-Dame, à Sézanne (Marne).

DESCHAMPS (Dr **Eugène**), 22, rue de la Monnaie, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

DESCOMBES (**Léon**), Professeur au Lycée de Bourg (Ain).

DESLANDRES (**H.**), Membre de l'Institut, Astronome titulaire à l'Observatoire d'Astronomie physique de Meudon, 56 *bis*, route des Gardes, à Bellevue (Seine-et-Oise).

DESLIS, Imprimeur, 6, rue Gambetta, à Tours (Indre-et-Loire).

DESPLANS (**Maurice**), Professeur au Collège de Carpentras (Vaucluse).

DESROZIERS, Ingénieur civil des Mines, 10, avenue Frochot. Paris, 9e.

DETAILLE (**Charles**), Professeur au Lycée, 81, rue du Couédic, à Saint-Brieuc (Côtes-du-Nord).

DEVAUD, Professeur au Lycée, 68, rue Sénac, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

DEVAUX (**Henri**), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Bordeaux (Gironde).

DEVAUX-CHARBONNEL, Ingénieur des Télégraphes, 286, boulevard Raspail. Paris, 14e.

DICKSTEIN (**S.**), rue Marszalkowska, 117, à Varsovie (Russie).

DINI (**Urbain**), 95, route de Saint-Leu, à Deuil, par Enghien (Seine-et-Oise).

DININ (**Alfred**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 2, quai National, à Puteaux (Seine).

DIOMARD, Professeur au Lycée d'Auch (Gers).

DIOT, Professeur au Lycée Condorcet, 72, rue Nollet. Paris, 17e.

DIRECTEUR (**Le**), de l'École Normale supérieure d'Enseignement primaire, à Saint-Cloud (Seine-et-Oise).

DITISHEIM (**Paul**), Fabricant de chronomètres, 11, rue de la Paix, à la Chaux-de-Fonds (Suisse).

DOIGNON (**L.**), Ingénieur-Constructeur, successeur de Dumoulin-Froment, 11, rue Hoche, à Malakoff (Seine).

DOMAGE (**Henry-Louis-Achille**), Ingénieur civil des Mines, Directeur de la Société nouvelle de Charbonnage des Bouches-du-Rhône, 4, rue de la Turbine, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

DOMERGUE (**E.**), Résident à Haïphong (Tonkin).

DOMMER, Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris, 12, rue Poisson. Paris, 17e.

DONGIER (**Raphaël**), Docteur ès sciences, Sous-Directeur du Laboratoire de Physique (Enseignement) de la Faculté des Sciences, 87 *bis*, Grande Rue, à Bourg-la-Reine (Seine).

DORGEOT (**Gabriel**), Chef d'escadron, Sous-Directeur de l'Artillerie, à Bastia (Corse).

DOUMER (Dr), Professeur à la Faculté de Médecine de Lille (Nord).

DOURIF (**Henry**), Ingr des Arts et Manufactures, 38, rue de Varennes. Paris, 7e.

MM.

DRAULT, Constructeur Électricien, 57, boulevard du Montparnasse. Paris, 6e.

DRINCOURT, Professeur au Collège Rollin, 10, place Bréda. Paris, 9e.

DREYFUSS (**E.**), Professeur au Lycée de Nancy (Meurthe-et-Moselle).

DROUIN (**Félix**), Ingénieur, 1 *bis*, avenue de Longchamp, à Boulogne-sur-Seine (Seine).

DUBOIS (Mlle **Hélène**), Professeur au Lycée de jeunes filles Victor-Hugo, 100, avenue des Ternes. Paris, 17e.

DUBOIS (**René**), Profr à l'École Turgot, 23, rue des Fossés-St-Jacques. Paris, 5e.

DUCESCU (**Constantin**), Administrateur de 1re classe, Sous-Chef de division aux Chemins de fer roumains, à Buzeu (Roumanie).

DUCHANGE (**Maurice**), Ancien élève de l'École Polytechnique, Ingénieur à la Compagnie des Mines de Béthune, à Bully-les-Mines (Pas-de-Calais).

DUCHAUSSOY (**Joseph-Herménégilde**), Professeur au Lycée, 2, rue Cosette, à Amiens (Somme).

DUCHEMIN, Ingénieur, 37, boulevard de la Tour-Maubourg. Paris, 7e.

DUCHESNE-FOURNET, Ancien Élève de l'École Normale supérieure, Klosbach Strasse, 77, à Zurich (Suisse).

DUCLAUX (**Jacques**), Docteur ès sciences, Préparateur à l'Institut Pasteur, rue Dutot, Paris, 15e.

DUCLOS, ancien Directeur d'École normale, à Cerisols, par Fabut (Ariège).

DUCOMET, Ingénieur, 7 et 9, rue d'Abbeville. Paris, 10e.

DUCRETET, Constructeur d'instruments de Physique, 75, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

DUDDELL (**W.**), Ingénieur, 47, Hans Place, Londres S. W. (Angleterre).

DUFFOUR, Professeur agrégé au Lycée de Bordeaux (Gironde).

DUFOUR (**Henri**), Profr de Physique à l'Université, avenue Rumière, Lausanne (Suisse).

DUFOUR, Agrégé préparateur de Physique à l'École Normale supérieure, 45, rue d'Ulm. Paris, 5e.

DUGAS (**Eugène-Georges-Joseph**), Professeur au Lycée, 17, rue de Châteaudun, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

DUHEM (**P.**), Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 18, rue de la Teste, à Bordeaux (Gironde).

DUJARDIN (**P.-J.-R.**), Héliographe, 28, rue Vavin. Paris, 6e.

DUMOULIN-FROMENT, Ancien Constructeur d'instruments de précision, 85, rue Notre-Dame-des-Champs. Paris, 9e.

DUNCAN (**Louis**), Ph. Dr Johns Hopkins University, Electrical Engineer, Member Math. Soc., 56, Pire S. G., New-York (U. S. A.).

DUNOYER, Agrégé, Préparateur de Physique au Collège de France, 7, rue de l'Orangerie, Versailles (Seine-et-Oise).

DUPLAA (**P.-J.**), Professeur au Collège de Pamiers (Ariège).

DUPESAN (Mlle **Madeleine**), Directrice du Collège de jeunes filles de Morlaix (Finistère).

DUPLAND (Mlle **Clémence**), Professeur à l'École normale d'Institutrices de Privas (Ardèche).

MM.

DUPONT (**Charles**), Électricien, à Saint-Mihiel (Meuse).

DURAND (Dr **Ernest**), Préparateur à la Faculté des Sciences, 50, rue Monge. Paris, 5e.

DURAND, Professeur au Lycée, rue Esplanade, à Mostaganem (Algérie).

DUSSAUD, Ingénieur Conseil, Docteur ès sciences, 14, rue Dancet, à Genève (Suisse), et 19, rue Guillaume-Tell. Paris, 17e.

DUSSY, Professeur au Lycée, 46, rue Saint-Lazare, à Dijon (Côte-d'Or).

DUTOIT (Dr **Constant**), Docteur ès sciences, Professeur, 3, avenue de Georgette, à Lausanne (Suisse).

DVORAK (Dr **Vincent**), Professeur à l'Université d'Agram (Autriche-Hongrie).

DYBOWSKI (**A.**), Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 16, rue Rottembourg. Paris, 12e.

EBEL, Ingénieur en chef du Secteur électrique des Champs-Élysées, 2, avenue des Ternes. Paris, 17e.

EDELBERG (**Alexandre**), Ingénieur opticien à Kharkoff (Russie).

EGINITIS (**Basile**), Professeur à l'École des Evelpides, à Athènes (Grèce).

ÉGOROFF (**Nicolas**), Sous-Directeur de la Chambre centrale des Poids et Mesures, 19, Zabalkansky, à Saint-Pétersbourg (Russie).

ÉGOROFF (**Serge**), Directeur de l'École commerciale de Tomsk (Russie).

EIFFEL (**Gustave**), Ingénieur, 4, rue Rabelais. Paris, 8e.

ÉLIE (**B.**), 90, rue de la Pointe, à Abbeville (Somme).

ÉMERY (**Isidore-Eugène**), Capitaine d'Artillerie, Membre de la Commission d'expériences de Bourges, 102, rue des Crosses, à Bourges (Cher).

ENGEL, Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, 2, rue Rosa-Bonheur. Paris, 15e.

EÖTVÖS (Baron **Roland**), Professeur à l'Université, 3, Esyterhazy uteza, à Budapest (Hongrie).

ESCOFFIER (**Honoré**), Professeur au Collège, 9, rue Guillaumont, à Antibes (Alpes-Maritimes).

ÉTIENNE (**Louis**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et de la Compagnie P.-L.-M., 4, rue Bara. Paris, 6e.

EWERS (**Paul**), Dr Phil. Privat-docent f. Physik, Technische Hochschule Physikalischen Institut, à München (Allemagne).

FABRY (**Charles**), Professeur à la Faculté des Sciences, 1, rue Clapier, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

FAILLON (**Nicolas-Jules**), Professeur au Collège de Chatellerault (Vienne).

FAILLOT, Professeur au Lycée de Nancy (Meurthe-et-Moselle).

FAIVRE-DUPAIGRE (**Jules**), Inspecteur d'Académie, 9, rue du Val-de-Grâce. Paris, 5e.

FARCOT (**Emmanuel-François-Michel, fils**), Ingénieur-Constructeur, 159, rue Lafayette, Paris.

FARGE (**Émile**), Professeur au Lycée de Cahors (Lot).

MM.

FAUCON (**Antonin-Marius**), Chef des Travaux pratiques de Physique à l'École supérieure de Pharmacie, 14, avenue Bouisson-Bertrand, à Montpellier (Hérault).

FAURE (**Henri**), Ingénieur de la Marine, à Bizerte (Tunisie).

FAVÉ, Ingénieur hydrographe en chef de la Marine, 1, rue de Lille. Paris, 7e.

FAVARGER, Ingénieur électricien, à Neuchâtel (Suisse).

FÉLIX (**Venceslas**), Phil. Dr Professeur agrégé à l'École Polytechnique tchèque de Prague, Karlovonaur, 14, à Prague (Autriche).

FERRA (**C.-J.**), Directeur de l'Observatoire central de l'Indo-Chine, à Phu-Lien (Tonkin).

FERREIRA DA SILVA, Professeur à l'École Polytechnique, 41, rua do Lavanjal, à Porto (Portugal).

FERY (**Charles**), Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles de la ville de Paris, 42, rue Lhomond. Paris, 5e.

FESQUET (**Émile**), Professeur au Collège, 1, rue Emmery, à Dunkerque (Nord).

FIGUIER (Dr **Alban**), Professeur à la Faculté de Médecine et de Pharmacie, 17, place des Quinconces, à Bordeaux (Gironde).

FLORENTIN (**Gabriel**), Ingénieur aux forges et aciéries de Donetz, à Droujkowka, gouvt d'Ekaterinoslaw (Russie).

FONSECA BENEVIDES (**Francisco da**), Directeur de l'Institut industriel et commercial de Lisbonne (Portugal).

FONTAINE (**Eugène**), ancien Élève de l'École Polytechnique, Ingénieur des Mines, 27, rue Tronchet, Paris, 8e.

FONTAINE (**Georges**), Chimiste, 203, boulevard Saint-Germain. Paris, 7e.

FONTAINE (**Hippolyte**), Ingénieur électricien, 58, rue Notre-Dame-des-Champs. Paris, 6e.

FONTAINES (**Ernest de**), Ingénieur des Arts et Manufactures, à Morvillars (Haut-Rhin français).

FONTANEAU (**Étienne-Jean-Éleonor**), ancien Officier de Marine, 8, cours Bugeaud, à Limoges (Haute-Vienne).

FOREST-PALMER (**Albert de**), Ph. Dr Associate Professor of Physics, Brown University. Providence, Rhode Island (U. S. A.).

FORTIN (**Charles**), 59, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

FORTIN (**Jules**), Ingénieur, 8, rue de la Préfecture, à Carcassonne (Aude).

FOUARD, Ingénieur des Arts et Manufactures, Licencié ès Sciences, attaché à l'Institut Pasteur, 25, rue Dutot, Paris 15e.

FOUCHÉ (**Ed.**), Ingénieur, 19, avenue de Clichy. Paris, 17e.

FOURNEL, Professeur à l'École pratique d'Industrie, 3, cours Devillers, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

FOUSSEREAU, Docteur ès sciences, 5, place de Jussieu. Paris, 5e.

FOVEAU DE COURMELLES (le Dr), 26, rue de Châteaudun. Paris, 9e.

FRANCHIMONT (**Antoine-Paul-Nicolas**), Professeur de Chimie organique à l'Université de Lille, Rapenbung, 104, à Leide (Pays-Bas).

FREDET (**Henri**), Industriel à Brignoud (Isère).

MM.

FRÉMONT SAINT-CHAFFRAY (Mme **B.**), 54, rue de Seine, Paris, 6e.

FRICKER (**Georges**), Licencié en droit, 36, avenue de Ceinture, à Enghien (Seine-et-Oise).

FRIDERICH (**Louis**) Docteur ès Sciences, 72, rue de Taitbout. Paris, 9e.

FROC (le R. P.), à l'observatoire de Zi-Ka-Weï, près Chang-Haï (Chine).

FRON, Météorologiste titulaire au Bureau central météorologique, 19, rue de Sèvres. Paris, 6e.

FRUTIGER (**Georges**), Dr ès Sciences, Professeur, 4, rue de Hesse, à Genève (Suisse).

GAGNIÈRE (**Jean**), Industriel, produits pharmaceutiques, 6, rue Ballainvilliers, à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

GAIFFE (**Georges**), Constructeur d'instruments de Physique, 40, rue Saint-André-des-Arts. Paris, 6e.

GAILLARD (**Jules**), Professeur au Collège Stanislas, 43, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

GAILLARD (**Léon**), Élève à l'École d'Électricité, 92, r. du Cherche-Midi. Paris, 6e.

GAILLARD (**Pierre**), Professeur au Lycée de Saint-Étienne (Loire).

GALIMARD, Industriel, à l'abbaye de Flavigny (Côte-d'Or).

GALITZINE (Prince **Boris**), Membre de l'Académie impériale des Sciences, Fontanka, 144, à Saint-Pétersbourg (Russie).

GALL (**Henri**), Directeur de la Société d'Électrochimie, 5, rue Albert-Joly, à Versailles (Seine-et-Oise).

GALLIE (**Louis**), Professeur au Collège, Grande-Rue, à Mortain (Manche).

GALLOTTI, Professeur au Lycée, 20, place du Martroi, à Orléans (Loiret).

GALY, Professeur au Lycée de Brest (Finistère).

GARBE, Doyen de la Faculté des Sciences de Poitiers (Vienne).

GARDET (**Alfred**), Censeur du Lycée de Besançon (Doubs).

GARIEL (**C.-M.**), Inspecteur général des Ponts-et-Chaussées, Membre de l'Académie de Médecine, Professeur à la Faculté de Médecine, 6, rue Édouard-Detaille. Paris, 17e.

GASCARD (**Albert**), Professeur à l'École de Médecine et de Pharmacie, 33, boulevard Saint-Hilaire, à Rouen (Seine-Inférieure).

GAULTIER (**G.**), Ingénieur, 14, rue Dumont-d'Urville. Paris, 16e.

GAUMONT, Directeur du Comptoir général de Photographie, 57, rue Saint-Roch. Paris, 1er.

GAUTHIER (**Paul**), Professeur au Lycée de Bourg (Ain).

GAUTHIER-VILLARS (**Albert**), Imprimeur-Éditeur, Ancien Élève de l'École Polytechnique, 55, quai des Grands-Augustins. Paris, 6e.

GAUTIER (**P.**), Constructeur d'instruments de précision, Membre du Bureau des Longitudes, 56, boulevard Arago. Paris, 13e.

GAY (**Henri**), Professeur en congé, 14, rue François-Henri, aux Prés-Saint-Gervais (Seine).

GAY (**Jules**), Professeur honoraire au Lycée Louis-le-Grand, Examinateur d'admission à l'École militaire de Saint-Cyr, 16, rue Cassette Paris, 6e.

MM.

GAYON, Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, Directeur de la Station agronomique, 7, rue Duffour-Dubergier, à Bordeaux (Gironde).

GEITLER (Dr **Josef-Ritter von**), Professeur Deutsche Universitat de Prague (Autriche).

GENDRON (**Rodolphe**), Préparateur de Physique à l'Institut catholique, 6, rue Gassendi. Paris, 14e.

GEORGIEWSKI (**Nicolas**), Institut technologique, à Saint-Pétersbourg (Russie).

GERARD (**Eric**), Professeur à l'Université, Directeur de l'Institut électrotechnique de Montefiore, 35, rue Saint-Gilles, à Liége (Belgique).

GERNEZ, Maître de Conférences à l'École Normale supérieure, Professeur à l'École Centrale des Arts et Manufactures, 80, rue d'Assas. Paris. 6e.

GESCHÉ (**Louis**), Chargé de Cours à l'Université de l'État, 3, rue Van Monckhoven, à Gand (Belgique).

GHEURY (**Maurice-Edouard-Joseph**), Woolwich Polytechnic. Londres. E. C. (Angleterre).

GHESQUIER (l'abbé), Directeur de l'École des Hautes études industrielles, 13, rue de Toul, à Lille.

GIBERT (**Eugène-Louis-Marie**), Chef d'escadron d'Artillerie coloniale, 9bis, rue Baudin, à Rochefort (Charente-Inférieure).

GIBERT, Profe de Physique à l'École Colbert, 146, boulevard Magenta. Paris, 10e.

GILLES (**A.**), Inspecteur général de l'Instruction publique, 11, rue Michelet. Paris, 6e.

GIRAN (**Henri**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 13, rue École-de-Pharmacie, à Montpellier (Hérault).

GIRARD (**Charles**), Directeur du Laboratoire municipal, 2, rue de la Cité. Paris, 4e.

GIRARDET, Professeur honoraire du Lycée Saint-Louis, 90, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

GIRARDET (**Fernand**), chargé de Cours à l'École supérieure de Pharmacie, 43, rue du Faubourg-Saint-Jean, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

GIRARDIN (l'abbé **Maurice**), Professeur de Physique, place de la Tombe, à Kain-lez-Tournai (Belgique).

GIRAULT, Directeur de l'École municipale Lavoisier, 19, rue Denfert-Rochereau. Paris, 5e.

GIROUX (**Lucien**), Ingénieur opticien, successeur de M. Roulot, 19, rue de l'Odéon. Paris, 6e.

GIVERT (**Arthur**), Professeur au Lycée, 10, rue de la Marine, à Caen (Calvados).

GODART (**Léon**), Docteur ès sciences, Professeur au Lycée Saint-Louis, 28, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

GODEFROY (l'abbé **L.**), Ancien professeur de Chimie à l'Institut catholique.

GODEFROY (**R.-E.**), Professeur à l'École Normale d'Instituteurs de la Seine, 10, rue Molitor. Paris, 16e.

MM.

GODRON (**Henri**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 73, rue Crevier, à Rouen (Seine-Inférieure).

GODY (**G.**), Directeur de service au Ministère des Chemins de fer, Postes et et Télégraphes, 15, rue du Viaduc, Bruxelles (Belgique).

GOISOT (**George**), Ingénieur, 10, rue Bélidor. Paris, 17e.

GOLAZ (**L.**). Constructeur d'instruments à l'usage des Sciences, 25 *bis*, avenue de Montsouris. Paris, 14e.

GOLDHAMMER (**Démétrius**), Professeur de Physique à l'Université de Kasan (Russie).

GOLDSCHMIDT (**Robert**), Docteur ès sciences chimiques, 54, avenue des Arts, à Bruxelles (Belgique).

GOLOUBITZKI (**Paul**), Collaborateur de la Société des Amis des Sciences de Moscou, à Kalouga Faroussa (Russie).

GONZALEZ (**Quijano**), Dr en Médecine, à Port-Saint-Père (Loire-Inférieure).

GORSSE, Professeur au Collège Rollin, 19, rue Nollet. Paris, 17e.

GOSSART (**Émile**), Professeur à la Faculté des Sciences, 68, rue Eugène-Ténot, à Bordeaux (Gironde).

GOURÉ DE VILLEMONTÉE (**Gustave**), Docteur ès sciences, professeur au Lycée Buffon, 31, rue de Poissy. Paris, 5e.

GOURGUECHON (**Georges**), Ingénieur au Corps des Mines, Chef du Service des Mines de la Régence de Tunis, 17, rue Es Sadikia, à Tunis (Tunisie).

GOUY (**G.**), Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences de Lyon (Rhône).

GRAETZ (**Léo de**), Dr Phil., Professeur à l'Université, Arcisstrasse, 8, à Munich (Bavière).

GRAMONT (**Arnaud de**), Dr ès sciences physiques, 179, rue de l'Université. Paris, 7e.

GRAU (**Félix**), Professeur au Lycée de Reims.

GRAY (**Robert Kaye**), Ingénieur électricien de l'India-Rubber, Gutta-Percha and Telegraph Works Co, Silvertown, Essex, à Londres (Angleterre).

GREFFE (**E.**), Professeur au Lycée Henri IV, 2, rue Leneveux. Paris, 5e

GRÉHANT (Dr), Professeur de Physiologie générale au Muséum, 90, cours de Vincennes. Paris, 12e.

GRENET (**Louis**), Ingénieur civil des Mines, 25, route de Paris, à Montluçon (Allier).

GRIMALDI (**Giovan Petro**), Docteur ès sciences physiques, Directeur du Laboratoire et Professeur de Physique à l'Université Royale, 25, Via Androne, Catania, Sicile (Italie).

GRIPON, Professeur honoraire à la Faculté des Sciences, 12, rue du Mont-Thabor, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

GRIVEAUX (**F.**), Professeur au Lycée Ampère, à Lyon (Rhône).

GRIVOLAS (**Claude**), Ingénieur civil, Administrateur délégué de la Compagnie française d'Appareillage électrique, 16, rue Montgolfier. Paris, 3e.

GROGNOT (**L.**), Ingénieur chimiste, 18, rue Labat. Paris, 18e.

GROOT (le P. **L.-Th. de**), Berg en Dalsche weg, Numegen (Hollande).

MM.

GROSSELIN, Vice-Président de la Société internationale des Électriciens, Ingénieur civil des Mines, 69, avenue Henri-Martin, Paris, 16e.

GROSSETESTE (**William**), Ingénieur civil, 67, avenue Malakoff. Paris, 16e.

GROUVELLE, Ingénieur, Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, 18, avenue de l'Observatoire. Paris, 6e.

GUCCIA (**G.-B.**), Professeur de Géométrie supérieure à l'Université de Palerme, Directeur des *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo*, 30, via Ruggiero Settimo, à Palerme (Italie).

GUEBHARD (Dr **Adrien**), Agrégé des Facultés de Médecine, à Saint-Vallier-de-Thiey (Alpes-Maritimes).

GUERBY (**A.**), Professeur en retraite, à Grasse (Alpes-Maritimes).

GUERBY, Professeur au Lycée, 18, rue Sommeilière, à Annecy (Haute-Savoie).

GUÉRIN (**Georges**), Docteur en Médecine, Licencié ès sciences, 70, avenue Kléber. Paris, 16e.

GUÉROULT (**Georges**), Ancien Inspecteur des finances, Trésorier-Payeur général honoraire, 7, square Alboni. Paris, 16e.

GUERPILLON (**A.**), Professeur au Lycée de Toulouse (Haute-Garonne).

GUILLAUME (**Ch.-Ed.**), Docteur ès sciences, attaché au Bureau international des Poids et Mesures, au Pavillon de Breteuil, à Sèvres (Seine-et-Oise).

GUILLAUME (**Édouard**), Professeur à l'Institut Concordia, à Zurich (Suisse).

GUILLEMINOT, Docteur en Médecine, 13, chaussée de la Muette. Paris, 16e.

GUILLET, Secrétaire de la Faculté des Sciences, 158, rue St-Jacques. Paris, 5e.

GUILLIN (**Louis**), Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Besançon (Doubs).

GUILLOZ (Dr **Th.**), Agrégé, Chef des travaux du Laboratoire de Physique médicale à la Faculté de Médecine, 24, place de la Carrière, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

GUINARD (**A.**), Armurier, 8, avenue de l'Opéra. Paris, 1er.

GUINCHANT (**J.**), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 166, rue Saint-Jean, à Caen (Calvados).

GUNTZ, Professeur à la Faculté des Sciences, 9, rue Hermite, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

GUTTON (**Camille**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 14, rue du Grand-Verger, Nancy (Meurthe-et-Moselle).

GUYE (**Ch.-Ed.**), Docteur ès sciences, Professeur de Physique à l'Université, 41, route de Chêne, à Genève (Suisse).

GUYE (**Philippe-A.**), Docteur ès sciences, Professeur de Chimie à l'Université, 3, Chemin des Cottages, à Genève (Suisse).

HAAS (**Marc de**), Dr Professeur de Physique à l'École Polytechnique de Delft (Hollande).

HADAMARD (**Jacques**), Professeur-adjoint à la Faculté des Sciences, 25, rue Humbolt, Paris, 14e.

HAGENBACH-BISCHOFF, Professeur à l'Université, 6, Elisabethstrasse, à Bâle (Suisse).

MM.

HAGENBACH (**Auguste**), Docteur Professeur à l'Université, Gerlachstrasse, à Aix-la-Chapelle (Allemagne).

HALE (**George-E.**), Directeur de l'Observatoire solaire, Mount Wilson, California (États-Unis).

HALLER (**A.**), Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 10, rue Vauquelin. Paris, 5e.

HAMILTON (**George-A.**), Ingénieur électricien, 532, Morris Av., Élisabeth N. Y., New-Jersey (U. S. A.).

HAMY (**Maurice**), Astronome titulaire à l'Observatoire, 16, rue de Bagneux. Paris, 6e.

HANRIOT (**Th.**), Ancien recteur des Ardennes, Professeur honoraire de Physique de la Faculté des Sciences de Lille, 6, rue Pichon, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

HARET, Docteur en Médecine, 8, rue Pierre-Haret. Paris, 9e.

HARKER (Dr **John-Allen**), The National Physical Laboratory, Teddington Middlesex (Angleterre).

HARTMANN (**Louis**), Lieutenant-colonel d'artillerie en retraite, 16, rue Pasteur, au Vésinet (Seine-et-Oise).

HASENÖHRL (**Fritz**), Dr Privat-docent de Physique à l'Université, IX, Borsckegasse, 4, à Vienne (Autriche).

HAUDIÉ (**Edgard**), Professeur à l'École navale, 88 *bis*, rue de Paris, à Brest (Finistère).

HEEN (**Pierre de**), Membre de l'Académie Royale, Directeur de l'Institut de Physique, 9, rue Momilphe, à Liége (Belgique).

HEGER (**Paul**), Professeur de Physiologie, Institut Solvay (Parc Léopold), Bruxelles (Belgique).

HELLE (**Alfred**), Chimiste à la Rhenania, à Stolberg, près Aix-la-Chapelle (Allemagne).

HELLER (**Richard-Ch.**), Ingénieur, 18, cité Trévise. Paris, 9e.

HEMARDINQUER (**Ch.**), Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences, 7, rue de la Cerisaie. Paris, 4e.

HEMPTINNE (**Alexandre de**), 56, rue de la Vallée, à Gand (Belgique).

HEMSALECH (**G.-A.**), Fellow of Owens College, à Manchester (Angleterre).

HENRY (**Aimé**), Professeur au Lycée, 56, rue Clovis, à Reims (Marne).

HENRY (**Alfred**), Ingénieur de la Raffinerie A. Sommier et Cie, 145, rue de Flandre. Paris.

HENRY (**Édouard**), Professeur de physique au Lycée, 28, rue Capitaine-Lefort, à Lorient (Morbihan).

HENRY (**Louis d'**), Ingénieur chimiste et électricien, 6, boulevard de Port-Royal. Paris, 5e.

HENRI (**Victor**), Préparateur de Physiologie à la Faculté des Sciences, 13, rue du Val-de-Grâce. Paris, 5e.

HEPITES (**Stefan**), Directeur de l'Institut météorologique à Bucarest (Roumanie).

MM.

HERMANN (**A.**), Libraire-Éditeur, 8, rue de la Sorbonne. Paris, 5e.

HERNANDEZ (**Pedro**), Professeur de l'Instruction primaire et secondaire, apartado 75, Morella Michoacan (Mexique),

HERSCHOUN (**Alexandre**), Professeur à l'École d'Artillerie des Officiers de Marine, à Cronstadt (Russie).

HERSE (**Charles-Alexandre**), Professeur au Collège, 12, rue du Beffroi, à Soissons (Aisne).

HERZOG (**Paul**), 15, avenue du Trocadéro. Paris, 16e.

HESEHUS (**N.**), Professeur à l'Institut technologique de l'Empereur Nicolas I, à Saint-Pétersbourg (Russie).

HILLAIRET (**André**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 22, rue Vicq-d'Azir. Paris, 10e.

HOCFIZ (**Mohammed**), Ingénieur à Mausouroch (Égypte).

HOLLARD (**Auguste**), Chef du Laboratoire central des usines de la Cie française des Métaux, 72, rue de la Gare, à Saint-Denis (Seine).

HOMEN (**Théodore**), Professeur à l'Université d'Helsingfors (Finlande).

HONDA (**Kotaro**), Professeur à l'Université de Tokio (Japon).

HONDL (**Stanko**). Dr en Ph., Professeur au Gymnase, Professeur agrégé à l'Université, Raineroval ul, 17, à Agram (Autriche).

HOSPITALIER, Ingénieur des Arts et Manufactures, Professeur à l'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris, 87, boulevard Saint-Michel. Paris, 5e.

HOSTEIN, Proviseur du Lycée, 37, rue Isabey, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

HOULLEVIGUE, Professeur à la Faculté des Sciences de Marseille (Bouches-du-Rhône).

HOWE (**Henry M.**), Professeur de Métallurgie à Columbia University, 27, West 73rd Street, New-York City (États-Unis).

HUBERT (**Herman**), Inspecteur général des Mines, Professeur à l'Université, 68, rue Fabry, à Liége (Belgique).

HUDELO, Répétiteur à l'École centrale, 10, rue Saint-Louis-en-l'Ile. Paris, 4e.

HUET (**Ernest**), Docteur en Médecine, 21, rue Jacob. Paris, 6e.

HURION, Professeur à la Faculté des Sciences, boulevard de Brosses, à Dijon (Côte-d'Or).

HURMUZESCU (**Dragomir**), Docteur ès sciences, Professeur à la Faculté des Sciences de Jassy (Roumanie).

HUSSON (**Léon**), Directeur de l'*Eastern Extension Telegraph Co*, à Foochow (Chine).

HUTIN (**Maurice**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, 73, rue de Maubeuge. Paris, 9e.

ICOLE (**Léon**), Professeur au Lycée, 2, rue de la Cathédrale, à Nevers (Nièvre).

IMBAULT (**G.**), Censeur du Lycée de Nantes (Loire-Inférieure).

IMBERT, Ancien Directeur des études à l'École centrale des Arts et Manufactures, Membre du Conseil de perfectionnement, 2, place Voltaire. Paris, 11e.

MM.

IMBERT (**Armand**), Professeur de Physique à la Faculté de Médecine de Montpellier (Hérault).

INFREVILLE (**Georges d'**), Ex-Électricien de la *Western Union Telegraph C^o^*, Expert de la *National Bell Telephone C^o^*, 110, Liberty street, à New-York (États-Unis).

INFROIT (**Charles**), Directeur du service de la radiographie de la Salpêtrière, 8, rue des Saints-Pères. Paris, 6e.

IRAGUE (**Julien**), Chargé de Cours de Physique au Lycée, 96, rue Sainte Claire, à Cahors (Lot).

IVANOFF (**Constantin**), Assistant de Physique à l'Université d'Odessa (Russie).

IZARN (**Joseph**), Professeur au Lycée Pascal, 34, rue Bansac, à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

JACOBS (**Fernand**), Président de la Société belge d'Astronomie, 21, rue des Chevaliers, à Bruxelles (Belgique).

JAGER (**Gustav**) Docteur, Professeur de Physique « Technischer Hochschule », Vienne (Autriche).

JAMBART (**J.**), Professeur au Lycée, 40, avenue St-Roch, à Valenciennes (Nord).

JANET (**Paul**), Professeur à la Faculté des Sciences, Directeur du Laboratoire central et de l'École supérieure d'Électricité, 8, rue du Four. Paris, 6e.

JANSSEN, Membre de l'Institut, Directeur de l'Observatoire d'Astronomie physique, à Meudon (Seine-et-Oise).

JAPY (**Paul-Albert-Jean-Émile**), Ingénieur des Arts et Métiers, à Berne, par Seloncourt (Doubs).

JAQUEROD (**Adrien**), Docteur ès sciences à la Faculté des Sciences de Neuchâtel (Suisse).

JARDIN, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Marseille (Bouches-du-Rhône).

JARIAS (**Germain-Mathieu**), Chargé de Cours, 50, boulevard Barbanègre, à Pau (Basses-Pyrénées).

JARRE (**L.-M.**), Ingénieur électricien, anciennement attaché à la Maison Sautter, Harlé et Cie, 9, rue Louis-le-Grand. Paris, 2e.

JAUBERT (**Georges**), Docteur ès sciences, 155, boulevard Malesherbes. Paris, 17e.

JAUMANN (Dr **Gustav**), Professeur de Physique à l'École Polytechnique, à Brünn (Autriche).

JAVAL (Dr **Émile**), Membre de l'Académie de Médecine, 5, boulevard La Tour-Maubourg. Paris, 7e.

JAVAL (**Jean**), Membre du Conseil général de l'Yonne, 45, rue de Boulainvilliers. Paris, 16e.

JAVAUX (**Émile**), Administrateur-Directeur de la Société Gramme, 130, boulevard Pereire. Paris. 17e.

JÉNOT, Prof^r^ honoraire au Collège Rollin, 11, rue Caulaincourt, Paris, 18e.

MM.

JOANNIS (l'abbé **Joseph de**), Licencié ès sciences physiques et mathématiques, 7, rue Coëtlogon. Paris, 6e.

JOB, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Toulouse (Haute-Garonne).

JOBIN (**A.**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, Constructeur d'instruments de précision, successeur de M. Léon Laurent, 21, rue de l'Odéon. Paris, 6e.

JOLY (**A.**), Professeur au Lycée de Toulouse (Haute-Garonne).

JOLY (**Louis**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, 20, rue Delambre, Paris, 14e.

JORDAN (**Charles**), Docteur ès Sciences, 1, Lisznyai Utca 15, à Budapest (Hongrie).

JOSEPH (**Paul**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, à l'Ile d'Yeu (Vendée).

JOUBERT, Insp^r général de l'Instruction publique, 67, rue Violet. Paris, 15e.

JOUBIN, Doyen de la Faculté des Sciences de Grenoble (Isère).

JOYE (**Paul**), Assistant au Laboratoire de Physique de l'Université de Fribourg (Suisse).

JOYEUX (**Eugène**), 10, avenue de Bellevue, à Sèvres (Seine-et-Oise).

JUDIC (**Georges**), Ingénieur électricien, 26, rue Tourlaque. Paris, 18e.

JUNGFLEISCH (**E.**), Professeur à l'École supérieure de Pharmacie, 74, rue du Cherche-Midi. Paris, 6e.

JUSTO Y SANCHEZ-BLANCO (**Manuel de**), Ingénieur, Docteur ès sciences, Professeur à l'École supérieure des Arts et Métiers, Prado 27-2, à Madrid (Espagne).

KAHN (Mlle **Hélène-Andrée**), Professeur de Sciences au Collège de jeunes filles d'Orléans (Loiret).

KAPOUSTINE (**Théodore**), Professeur de Physique à l'Université de Tomsk (Sibérie).

KARPEN (**Vasilesco**), Ingénieur, Docteur ès Sciences, 11, rue Jules-Michelet, à Bucarest (Roumanie).

KELVIN (**Lord**), F. R. S., Professeur à l'Université de Glascow, Netherhall, Largs, Ayrshire (Ecosse), 15, Eaton Place, Londres, S. W. (Angleterre).

KERNTLER (**François**), Directeur de la Société du tunnel de Budapest, rue d'Albrecht, à Budapest II (Hongrie).

KLOTZ (**Henri**), 18, place Vendôme, Paris.

KNOLL, Préparateur de Physique au Lycée Louis-le-Grand, 123, rue Saint-Jacques. Paris, 5e.

KOCH (**René-Charles-Jean-François-Jules**), Ingénieur civil, 4, rue Férou, Paris, 6e.

KŒCHLIN (**Horace**), Chimiste, 19, avenue du Mont-Riboudet, à Rouen (Seine-Inférieure).

KOHLRAUSCH (**Friedrich**), Docteur Président A. D. der Physikalische Technischen Reichsanstalt, Marburg (Bezick-Cassel) (Allemagne).

KOLOWRAT, Licencié ès Sciences, 64, rue Saint-Louis-en-l'Ile. Paris, 4e.

MM.

KORDA (**Désiré**), Administrateur de la Société française d'électricité A. E. G., 15, rue Ambroise-Thomas. Paris, 9e.

KOROLKOFF (**Alexis**), Colonel d'Artillerie russe, Professeur de Physique à l'Académie d'Artillerie de Saint-Pétersbourg (Russie).

KOUSTOVSKY (**Mitrophan**), Professeur au gymnase russe, Russie Mariopol, mer d'Azow.

KOWALSKI (**E.**), Professeur à l'École supérieure du Commerce et de l'Industrie, 18, rue d'Alzon, à Bordeaux (Gironde).

KOWALSKI (**Joseph de**), Professeur à l'Université de Fribourg (Suisse).

KRAUSE (**G.**), Dr Profesr, Rédacteur des *Chemiker Zeitung*, Cöthen (Allemagne).

KROUCHKOLL, Docteur ès sciences et Docteur en Médecine, Chef des Travaux pratiques de Physique à la Faculté des Sciences, 150, avenue Wagram. Paris, 17e.

KUNTZMANN (**Louis**), Professeur au Collège, 1, rue Gambetta, à Pont-à-Mousson (Meurthe-et-Moselle).

LABBÉ (**Albert**), Interne à l'Asile de Ville-Évrard, par Neuilly-sur-Marne (Seine-et-Oise).

LABORATOIRE D'ESSAIS du Conservatoire des Arts et Métiers, 292, rue Saint-Martin, Paris.

LABORATOIRE DE PHYSIQUE DE L'UNIVERSITÉ, à Genève (Suisse).

LACOMBE (**E.**), Pharmacien, à Sarlat (Dordogne).

LACOUR (**Alfred**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, Ingénieur civil des Mines, 60, rue Ampère. Paris, 17e.

LACROIX (**Paul**), Directeur de la Compagnie Universelle d'Acétylène, 36, rue de Châteaudun. Paris, 9e.

LAFAY (**A.**), Capitaine, Professeur à l'École Polytechnique, 98, rue d'Arcueil, à Malakoff (Seine).

LAFFARGUE (**Joseph**), Licencié ès sciences physiques, Ingénieur électricien, 180, rue Lafayette. Paris, 10e.

LAFLAMME (Mgr), Membre de la Société géologique de France, Recteur de l'Université Laval, Québec (Canada).

LALA (**Ulysse**), Docteur ès sciences, Chef des Travaux de Physique à la Faculté des Sciences, Professeur de Mécanique et de Physique à l'École des Beaux-Arts et des Sciences Industrielles, 16, boulevard de Strasbourg, à Toulouse (Haute-Garonne).

LALLEMAND (**Charles**), Ingénieur en chef des Mines, Direction du nivellement général de la France, 66, boulevard Émile-Augier. Paris, 16e.

LAMBERT (**Pierre**), Ingénieur, 5, rue de la Tour-des-Dames. Paris, 9e.

LAMIRAND, Professeur au Lycée Saint-Louis, 4, rue Froidevaux. Paris, 14e.

LAMOTTE (**Marcel**), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand, 3, rue de Beaulieu, Chamalières (Puy-de-Dôme).

LAMPA (**A.**), Profesr à l'Université, Rieglergasse, 5, à Vienne (Autriche).

LANCE (Mlle), Préparatrice au Lycée Fénelon, 45, rue Saint-André-des-Arts. Paris, 6e.

MM.

LANCELOT (J.), Constructeur d'instruments d'acoustique, 70, avenue du Maine. Paris, 14e.

LANDRIN, Ancien Élève de l'École Polytechnique, 127, boulevard Malesherbes. Paris, 17e.

LANG (**Victor von**), Professeur à l'Université de Vienne (Autriche).

LANGEVIN (**P.**), Professeur adjoint au Collège de France, 29, rue Gazan. Paris, 14e.

LANIÈS, Professeur au Lycée de Toulouse (Haute-Garonne).

LAPORTE, Ingr civil des Mines, Ancien Élève de l'École Polytechnique, Chef des Travaux au Laboratoire central d'Électricité, 2, rue Saint-Simon. Paris, 7e.

LAPRESTÉ, Professeur au Lycée Buffon, 7, rue Nicolas-Charlet. Paris, 15e.

LARMOR (**Joseph**), Lucasian Professor of Mathematics Saint-John's College, Cambridge (Angleterre).

LAROCHE (**Félix**), Inspecteur Général des Ponts et Chaussées en retraite, 110, avenue Wagram. Paris, 17e.

LAROUSSE (**Auguste**), Professeur au Lycée, 31, rue du Bastion, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

LASSERRE, Professeur au Lycée, 39, rue Daguerre, à Alger (Algérie).

LATOUR, Professeur honoraire, 9, rue Daillière, à Angers (Maine-et-Loire).

LAURENT (**Léon**), Ancien Constructeur d'instruments d'Optique, 21, rue de l'Odéon. Paris, 14e.

LAURIOL (**Pierre**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 278, boulevard Raspail. Paris, 6e.

LAVIÉVILLE (**Augustin**), Inspecteur honoraire de l'Académie de Paris, 3, rue Legoff. Paris, 5e.

LAWTON (**George-Fleetwood**), Ingénieur-Directeur de l'*Eastern Telegraph C°*, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

LEBEDEW (**Jean**), Adjoint à l'Académie de Médecine de Saint-Pétersbourg (Russie).

LE BEL (**J.-A.**), Ancien Président de la Société chimique, 250, rue Saint-Jacques. Paris, 5e.

LEBERT (**Louis-Eugène**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, à Vannes (Morbihan).

LEBEUF (**Auguste-Victor**), Dr de l'Observatoire National de Besançon (Doubs).

LEBLANC (**Maurice**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, 1, avenue de Boufflers, villa Montmorency. Paris, 16e.

LE BON (Dr **G.**), 29, rue Vignon. Paris, 8e.

LE CADET (**Georges**), Docteur ès sciences, Vice-Directeur de l'Observatoire central et du Service magnétique et météorologique de l'Indo-Chine, à Phu-Lien (Tonkin).

LECAT, Professeur au Lycée Janson-de-Sailly, 7, rue Gustave-Courbet. Paris, 16e.

LE CHATELIER (**André**), Ingénieur en chef de la Marine, 331, rue Paradis, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

LE CHATELIER (**Henry**), Ingénieur des Mines, Professeur au Collège de France et à l'École des Mines, 73, rue Notre-Dame-des-Champs. Paris, 6e.

MM.

LE CHATELIER (**Louis**), Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, 7, rue du Regard. Paris, 6e.

LE CHATELIER (**Charles**), 73, rue Notre-Dame-des-Champs. Paris, 6e.

LECHER (Dr **Ernst**), Professeur à l'Université de Prague (Autriche).

LECOIN, Professeur au Lycée, 80, rue Asselin, à Cherbourg (Manche).

LEDUC (**A.**), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 84, boulevard Saint-Michel. Paris, 6e.

LEDUC (Dr **Stéphane**), Professeur à l'École de Médecine, 5, quai de la Fosse, à Nantes (Loire-Inférieure).

LEFEBVRE (**Eugène**), Professeur honoraire, 2, rue des Réservoirs, à Versailles et à Menotey (Jura).

LEFEBVRE (**Pierre**), Professeur au Lycée, 10, rue de Noailles, à Versailles (Seine-et-Oise).

LEFÈVRE (**Julien**), à Chantenay-sur-Loire (Loire-Inférieure).

LEFÈVRE (**Z.-H.-D.**), Préparateur de Physique au Lycée, 10, rue Frédéric-Petit, à Amiens (Somme).

LEHMANN (**Théodore**), Ingénieur de la Société alsacienne de constructions mécaniques, à Belfort (Territoire de Belfort).

LEIGH (**Ch.-D.-E.**), The Victoria University of Manchester (Angleterre).

LEJEUNE (Dr **Louis**), Médecin électricien, 1, rue des Urbanites, à Liége (Belgique).

LEMERAY (**Maurice**), Licencié ès sciences mathématiques et physiques, Ingénieur civil, 51, boulevard de l'Océan, à Saint-Nazaire (Loire-Inférieure).

LEMOINE (**Émile**), Chef honoraire du Service de la vérification du gaz, 4, boulevard de Vaugirard, à Paris, 14e.

LEMOINE (**Constant**), Professeur au Lycée de Brest (Finistère).

LEMOINE (**Georges**), Membre de l'Institut, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Professeur à l'École Polytechnique, 76, rue Notre-Dame-des-Champs. Paris, 6e.

LEMOINE (**Jules**), Professeur au Lycée Louis-le-Grand, 72, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

LENARD (**Philippe**), Docteur en Pharmacie et Médecine, Professeur à l'Université, Niemannsweg, 22, à Kiel (Allemagne).

LENOIR (**Léon**), Professeur de Physique au Lycée, 10, rue de l'Ecusson, à Alençon (Orne).

LEPERCQ (**Gaston**), Professeur de Chimie à la Faculté libre, 3, rue Martin, à Lyon (Rhône).

LE POUPON (**Ferdinand**), Licencié ès sciences, Préparateur au Prytanée militaire, à La Flèche (Sarthe).

LEQUEUX (**P.**), Ingr des Arts et Manufactures, 64, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

LERAY (l'abbé), 14, rue de l'Archevêché, à Conflans-Charenton (Seine).

LERMANTOFF, Profr de Physique de l'Université de St-Pétersbourg (Russie).

LE ROUX, Professeur à l'École supérieure de Pharmacie, Examinateur à l'École Polytechnique, 120, boulevard Montparnasse. Paris, 14e.

LEROY (**J.**), Professeur au Lycée Michelet, 245, boulevard Raspail. Paris, 14e.

MM.

LESAGE (**Auguste**), Professeur au Lycée de Châteauroux (Indre).

LESOBRE, Professeur au Collège, 13, rue Crévoulin, à Melun (Seine-et-Marne).

LÉTANG (Dr **Marc**), 12, rue Desrenaudes. Paris, 17e.

LETELLIER (**Albert-Eustache**), Professeur au Lycée, 53, rue James Cane, à Tours (Indre-et-Loire).

LEUILLIEUX (Dr), Médecin de la Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest, à Conlie (Sarthe).

LÉVESQUE (Lieutenant), Section de Géodésie du Service Géographique de l'Armée, 140, rue de Grenelle. Paris, 7e.

LÉVY (**Armand**), Professeur de Physique, 9, rue du Lycée, à Besançon (Doubs).

LEVY (**Michel**). Membre de l'Institut, 26, rue Spontini. Paris, 16e.

LEYMARIE, Professeur au Lycée d'Évreux (Eure).

LHUILLIER, Professeur au Lycée, Directeur de l'Observatoire météorologique du Petit-Port, 15, passage Saint-Yves, à Nantes (Loire-Inférieure).

LIBRARY OF UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA, à Philadelphie (États-Unis). Chez M. Stechert, 76, rue de Rennes. Paris, 6e.

LIÉNARD (**Alfred-Marie**), Ingénieur des Mines, Professeur à l'École des Mines, 29, rue République, à Saint-Étienne (Loire).

LIMB (**Claudius**), Docteur ès sciences, Ingénieur-Conseil de la Maison Gindre Frères et Cie de Lyon, 18, quai de Retz, à Lyon (Rhône).

LINARDOS (**Georges**), Ingénieur industriel, Diplômé de l'École des Ponts et Chaussées de Paris, 2, rue Glavany, à Constantinople (Turquie).

LIPPICH (**Fr.**), Professeur à l'Université de Prague (Autriche).

LIPPMANN, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 10, rue de l'Éperon. Paris, 6e.

LOCHERER, Ingénieur des Ponts et Chaussées, 45, rue Ampère. Paris, 17e.

LŒWY (**Maurice**), Membre de l'Institut, Directeur de l'Observatoire national de Paris.

LOISELEUR, Chargé de cours de Sciences au Lycée, 11, rue Desfourniel, à Bordeaux (Gironde).

LORENTZ (**Hendrik-Antoon**), Professeur à l'Université, 48, Hovigracht, à Leiden (Hollande).

LORION, Professeur au Lycée Gay-Lussac, à Limoges (Haute-Vienne).

LOUGUININE (**W.**), Docteur honoraire, Professeur de Thermochimie à l'Université de Moscou, 77, avenue de Malakoff. Paris, 16e.

LUBOSLAWSKI (**Gennady**), Préparateur à l'Institut forestier de Saint-Pétersbourg (Russie).

LUCAS (Le R. P. **J.-D.**), S. I., Professeur à la Faculté des Sciences, Collège Notre-Dame-de-la-Paix, à Namur (Belgique).

LUGOL (**Paul**), Professeur au Lycée Saint-Louis, 86, avenue de Wagram. Paris, 17e.

LUMIÈRE (**Auguste**), Ingénieur-Chimiste, cours Gambetta, à Monplaisir (Lyon) (Rhône).

LUMIÈRE (**Louis**), Ingénieur-Chimiste, cours Gambetta, à Monplaisir (Lyon) (Rhône).

MM.

LUSSANA (**Silvio**), Docteur ès sciences, Directeur de l'Institut physique de l'Université de Sienne (Italie).

LYON (**Gustave**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, Ingénieur civil des Mines, Industriel, 22, rue Rochechouart. Paris, 9e.

MACALUSO (**D.**), Docteur, Professeur à l'Université de Palerme (Italie).

MAC LENNAN, Professeur à l'Université de Toronto, province d'Ontario (Canada).

MACH (Dr **ERNST**), Professeur de Physique à l'Université, XVIII, Gersthoferstrasse, Vienne (Autriche).

MACK (**Ed.**), Ingénieur, 54, rue de Lausanne, à Genève (Suisse).

MACQUET (**Auguste**), Ingénieur au corps des Mines, Directeur de l'École provinciale d'Industrie et des Mines du Hainaut, 22, boulevard Dolez, à Mons (Belgique).

MADAMET, Directeur des Forges et Chantiers de la Méditerranée, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

MAIGRET (Dr), 86, avenue de la République, à Montrouge (Seine).

MAILLY (**Paul-Marc**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Directeur de la Société anonyme d'Explosifs et de Produits chimiques, à Villafranca in Lunigiana (Italie).

MAISONOBE, Capitaine d'Artillerie, à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

MAJORANA (**Quirino**), Istituto fisico della Universita, à Rome (Italie).

MALASSEZ, Préparateur à la Faculté des Sciences, 166, boulevard Saint-Germain. Paris, 7e.

MALCLÈS, Préparateur à la Faculté des Sciences, 34, rue Gay-Lussac. Paris. 5e.

MALDINEY (**J.**), Professeur à l'École de Médecine et de Pharmacie, Chef des Travaux de Physique à la Faculté des Sciences, 32, rue Mégevand, à Besançon (Doubs).

MALLARD (**Henri**), Lieutenant au 2e régiment d'Artillerie, 17, rue Lesdiguières, à Grenoble (Isère).

MALLAT (R. P. **Jean**), Professeur au Collège du Sacré-Cœur, Schembaganur, Présidence de Madras (Indes anglaises).

MALOSSE, Professeur à l'École de Médecine d'Alger (Algérie).

MALTÉZOS, Docteur ès sciences, 129, rue Solon, à Athènes (Grèce).

MAMY (**J.**), Professeur au Lycée, 15, rue Thibaudeau, à Poitiers (Vienne).

MANEUVRIER, Directeur adjoint du Laboratoire des Recherches physiques, à la Sorbonne. Paris, 5e.

MANVILLE (**Octave**), Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Bordeaux (Gironde).

MANY, Professeur de Physique à l'École des Ponts et Chaussées, à Bucarest (Roumanie).

MARAGE (Dr), Docteur ès sciences, 14, rue Duphot. Paris, 1er.

MARCHIS, Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 106, rue Mazarin, à Bordeaux (Gironde).

MM.

MARIE, Préparateur de Physique au Lycée Charlemagne, 120, rue Saint-Antoine. Paris, 4e.

MARIE (Dr **Th.**), Professeur à la Faculté de Médecine et de Pharmacie, 11, rue de Rémusat, à Toulouse (Haute-Garonne).

MARSAL (**P.**), Professeur au Lycée, 27, rue Sigisbert-Adam, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

MARTIN (**Georges**), Ingénieur de la Station d'Éclairage électrique, 67, rue Rousseau, à Bar-le-Duc (Meuse).

MARTINET (**E.**), Professeur au Lycée Janson-de-Sailly, 16, rue Gustave-Zedé, Paris.

MARTINET, Professeur au Prytanée militaire, 5, Grande-Rue, à la Flèche (Sarthe).

MASCART, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France, Directeur du Bureau Central météorologique, 176, rue de l'Université. Paris, 7e.

MASCART (**Auguste**), Professeur au Collège, 73, rue Landrecies, Le Cateau (Nord).

MASSE (**Maurice**), Ancien Élève de l'École Polytechnique, Ingénieur civil des Mines, place de l'Église-du-Vœu, à Nice (Alpes-Maritimes).

MASSIN, Ingénieur des Télégraphes, 61, rue de Vaugirard. Paris, 6e.

MASSIOT (**G.**) (Maison Radiguet et Massiot), Constructeur d'instruments pour les Sciences, 15, boulevard des Filles-du-Calvaire. Paris, 3e.

MASSOL (**Noël-Gustave**), Directeur de l'École supérieure de Pharmacie, 20, boulevard des Arceaux, à Montpellier (Hérault).

MASSON (**Louis**), 33, rue de Vincennes, à Montreuil-sous-Bois (Seine).

MASSOULIER, Professeur au Lycée Henri IV, 97, villa Brune. Paris, 14e.

MATHIAS (**Émile**), Professeur à la Faculté des Sciences, 44, allée Lafayette, à Toulouse (Haute-Garonne).

MATHIEU (**Joseph-Louis**), Professeur au Lycée d'Évreux (Eure).

MATHIEU (**Louis**), Directeur de la Station œnologique de Bourgogne, à Beaune (Côte-d'Or).

MATHIEU (**Paul-Hyacinthe**), Licencié ès Sciences mathématiques et physiques, Ingénieur-Électricien E. S. E., Professeur de Physique, 3, rue Vauquelin. Paris, 5e.

MATHIEU (**Jean-François**), Ingénieur-Chimiste, 6, rue Choron. Paris, 9e.

MAUPEOU D'ABLEIGES (**de**), Ingénieur de la Marine, 1 *bis*, rue Pasteur, à Lorient (Morbihan).

MAURAIN (**Charles**), Professeur à la Faculté des Sciences de Caen (Calvados).

MAURIN (**Joseph-Léon-Marie**), ancien Élève de l'École Polytechnique, Lieutenant d'Artillerie coloniale, 18e, place de la République, à Lorient (Morbihan).

MAYER (Dr **André**), 33, rue du Faubourg-Poissonnière. Paris, 9e.

MAZEN (**Natalis**), Ingénieur du Service électrique des Chemins de fer de l'Ouest, 35, rue Magenta, à Asnières (Seine).

MECHLING (**Gustave**), Constructeur d'Instruments de précision en verre, 7, rue des Grands-Degrés. Paris, 5e.

MM.

MEISSONNIER, Chef des Travaux de Physique à la Faculté des Sciences, 78, boulevard de la Corderie, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

MELANDER, Préparateur à l'Université Skepparebrianten à Helsingfors (Finlande).

MENDELSSOHN (**Maurice**), Docteur en Médecine, Membre correspondant de l'Académie de Médecine, 49, rue de Courcelles. Paris, 8e.

MENIER (**Henri**), Ingénieur, 8, rue Alfred-de-Vigny. Paris, 8e.

MENSBRUGGHE (**Gustave-Léonard Van der**), Membre de l'Académie Royale, Professeur de Physique mathématique à l'Université, Coupure, 131, à Gand (Belgique).

MERCADIER, Directeur des Études à l'École Polytechnique, 21, rue Descartes. Paris, 5e.

MERCANTON (**Paul-Louis**), Professeur à l'Université, villa Decker, à Lausanne (Suisse).

MERCIER (**Pierre**), Chimiste, 23, rue des Moines. Paris, 17e.

MERCIER (**R.**), Ingénieur-Électricien, Élève diplômé de l'École supérieure d'Électricité, 20, rue Cujas. Paris, 5e.

MERLIN (**Paul**), Professeur au Lycée, 78, faubourg Vincent, à Châlons-sur-Marne (Marne).

MESLANS (**Maurice**), 59, quai de la Baronnie, à Ablon (Seine-et-Oise).

MESLIN (**Georges**), Professeur à la Faculté des Sciences, villa Marie, ancien chemin de Castelnau, Montpellier (Hérault).

MESNAGER (**Augustin**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Ingénieur des Canaux de la Ville de Paris, 182, rue de Rivoli. Paris, 1er.

MESTRE, Ingénieur à la Compagnie des Chemins de fer de l'Est, 168, rue Lafayette. Paris, 10e.

MÉTRAL (**Pierre**), Agrégé des Sciences physiques, Professeur à l'École Colbert, 239 *bis*, rue Lafayette. Paris, 10e.

METZ (**de**), Prof^r à l'Université St-Wladimir, 3, r. du Théâtre, à Kiew (Russie).

MEYER, Directeur de la Compagnie continentale Edison, 38, rue Saint-Georges. Paris, 9e.

MEYER (**J.**), Chef des Travaux de Physique à la Faculté des Sciences, 82, rue Saint-Georges, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

MEYER (**Dr Stefan**), Privat docent à l'Université, Turkenstrasse, 3, à Vienne (Autriche).

MEYLAN (**Eugène**), Ingénieur, 23, boulevard du Montparnasse. Paris, 6e.

MEYNIER, Professeur au Lycée de Rouen (Seine-Inférieure).

MICHAUT (**Victor**), Chargé de cours à l'Ecole de Médecine, 1, rue des Novices, à Dijon (Côte-d'Or).

MICHEL (**Auguste**), Constructeur d'instruments de Physique, 47, rue Lacordaire. Paris, 15e.

MICHEL (**Tranquille**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 35, avenue de Vauvenargues, à Aix (Bouches-du-Rhône).

MICHELSON (**Albert**), Professeur à l'Université de Chicago (États-Unis).

MICKS (**Richard**), Professeur au Gymnase communal, à Trieste (Autriche).

MM.

MICULESCU (**Constantin**), Professeur à l'Université, 3, Strada Spatarului à Bucarest (Roumanie).

MILLARD (**John-A.**), Docteur en Médecine, au château Sunnyside, à Dinard-Saint-Énogat (Ille-et-Vilaine).

MILLIS (**John**) Major, Corps of Engineers, United States army, U.-S. Engineer office, Manila, Philippine Islands (U. S. A.).

MITJAVILA (**Jaime**), Medico Mayor de Sanidad Militar, Urosas, 8, Madrid (Espagne).

MITKEWITCH (**Wladimir**), Assistant de Physique à l'Institut des Mines à Saint-Pétersbourg (Russie).

MIX (**Edgar-W.**), Ingénieur électricien, 12, boulevard des Invalides. Paris, 7e.

MOISSAN, Membre de l'Institut, 7, rue Vauquelin. Paris, 5e.

MOLTENI (**A.**), Ingénieur, 15, rue Origet, à Tours (Indre-et-Loire).

MONDAIN, Docteur en Médecine, 23, rue Joinville, Le Havre (Seine-Inférieure).

MONNIER (**D.**), Ingénieur, Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, 3, rue Cothenet, Paris, 16e.

MONNORY (**Henri**), ex-Professeur au Lycée Hoche, Directeur des études à l'Ecole centrale des Arts et Manufactures, 20, rue du Cloître-Notre-Dame. Paris, 4e.

MONOYER, Professeur à la Faculté de Médecine de Lyon (Rhône).

MONTEFIORE (**Levi**), Ingénieur, Sénateur du Royaume de Belgique, Fondateur de l'Institut électrotechnique, 35, rue de la Science, à Bruxelles (Belgique).

MONTHIERS (**Maurice**), 50, rue Ampère. Paris, 17e.

MONTLAUR (le comte **de**), Président de la Société de l'Électrochimie, 41, avenue de Friedland. Paris, 8e.

MORE (**Louis Tranchard**), Ph. D., Professeur de Physique à l'Université de Cincinnati, Cincinnati (Ohio) (U. S. A.).

MOREAU (**Georges**), Professeur à la Faculté des Sciences, 68, rue Saint-Hélier, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

MOREUX (l'abbé **Th.**), Professeur de Physique à l'École Saint-Célestin, à Bourges (Cher).

MORIN (**F.**), Docteur en Médecine, place Lamoricière, à Nantes (Loire-Inférieure).

MORIN (**Pierre**), Professeur au Lycée, rue des Faucheroux, à Montluçon (Allier).

MORIZE (**Henri**), Ingénieur civil, Docteur ès sciences, Astronome à l'Observatoire, Professeur de Physique à l'École Polytechnique, Rua Princeza Imperial, n° 20. Antigo, a Rio-de-Janeiro (Brésil).

MORIZOT, Chargé du Cours, au Lycée de Chaumont (Haute-Marne).

MOSER (Dr **James**), Privat docent à l'Université, 25, Laudon-Gasse, Vienne VIII/1 (Autriche).

MOUCHEL (**Charles**), Professeur de Sciences, 18, rue des Trois-Cornets, à Elbeuf (Seine-Inférieure).

MM.

MOULIN (**Honoré**), Capitaine à la Commission d'expériences de Calais, quai de l'Escaut, à Calais (Pas-de-Calais).

MOULIN, attaché au Laboratoire de Physique du Collège de France, 6, rue Chevreul. Paris, 11e.

MOUNEYRAT (**Antoine**), Docteur ès Sciences, Docteur en Médecine, 20, rue Godot-de-Mauroy. Paris, 9e.

MOUREAUX (**Th.**), Directeur de l'Observatoire du Parc Saint-Maur (Seine).

MOURET, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 22, rue du Perron, à Besançon (Doubs).

MOUSSELIUS (**Maximilien**), r. Boulwarnaia, maison Sokolowski, à Tsarskoë Selo (Russie).

MUHLL (**K. von der**), Professeur ordinaire de Physique mathématique à l'Université de Bâle (Suisse).

MUIRHEAD (**Alexandre**), F. C. S., The Lodge, Sportlands Kent (Angleterre).

MULLER (**P.-Th.**), Professeur à l'Université, 31, rue Victor-Hugo. Nancy (Meurthe-et-Moselle).

MURAT (**I. St.**), Sous-Directeur de l'Institut météorologique et du Service central des Poids et Mesures de Roumanie, à Bucarest (Roumanie).

MUTEL (**Alexandre**), Professeur au Lycée, 11, rue des Bégonias, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

MUYNCK (**René de**), Professeur à l'Université de Louvain (Belgique).

MYCHKINE, Professeur de Physique à l'Institut agronomique de Novo Alexandria (Russie).

NACHET (**A.**), Constructeur d'instruments d'Optique, 17, rue Saint-Séverin. Paris, 5e.

NACHET (**Camille**), Constructeur d'instruments d'Optique, 7, rue des Gravilliers. Paris, 3e.

NAGAOKA (**H.**), Docteur ès Sciences, Professeur de Physique à l'Université de Tokio (Japon).

NAMBA MASSASHI, Professeur à l'Université de Kioto (Japon).

NATANSON (**Ladislas**), Membre de l'Académie des Sciences de Cracovie, Professeur à l'Université, 8, rue Wolska, à Cracovie (Autriche).

NÉCULCEA (**Eugène**), 11 *bis*, rue Lacépède. Paris, 5e.

NEGREANO (**D.**), Professeur à l'Université, 13, boulevard Ferdinand, à Bucarest (Roumanie).

NERVILLE (**de**), Ingénieur des Télégraphes, 59, rue de Ponthieu. Paris, 8e.

NEU (**Lucien**), ancien Élève de l'École Polytechnique, Ingénieur-Conseil, 58, rue Brûle-Maison, à Lille (Nord).

NEVEU (**Raoul**), Constructeur d'instruments de Physique, 35, rue de la Montagne-Sainte-Geneviève. Paris, 5e.

NICOLAÏDES (**Emmanuel-C.**), Ingénieur-Électricien, Weinbergstrasse 22III. Zurich I (Suisse).

NICOLAIEVE (**Wladimir de**), Colonel d'Artillerie, professeur à l'École militaire Paul, à Saint-Pétersbourg (Russie).

MM.

NICOLLE (**Abel**), Ingénieur de la Marine à l'Arsenal, à Toulon (Var).

NICOLLIER (**Marius**), Professeur, Docteur ès Sciences, 20, rue de la Gare, à Montreux (Suisse).

NODON (**Albert**), Ingénieur-conseil, 12, rue de Moulis, à Bordeaux (Gironde).

NOÉ (**Charles**), Constructeur d'instruments pour les Sciences, 8, rue Berthollet. Paris, 5e.

NOGUÉ (**Émile**), Attaché à la Maison Pellin-Duboscq, 138, rue d'Assas. Paris, 6e.

NOGUES (**Henri**), Licencié ès Sciences mathématiques et physiques, Délégué de Physique au Lycée, 26, rue Saint-Léonard, à Angers (Maine-et-Loire).

NORDMANN (**Ch.**), Docteur ès Sciences, Attaché à l'Observatoire de Paris, 18, rue des Feuillantines. Paris, 5e.

NUGUES (**Émile**), Chef des travaux électriques à l'École Centrale des Arts et Manufactures, 31, rue Saint-Placide. Paris, 6e.

OFFRET (**Albert**), Professeur de Minéralogie à l'Université, Villa Sans-Souci, 53, Chemin des Pins, à Lyon (Rhône).

OGIER (**Jules**), Membre du Comité consultatif d'Hygiène publique, Chef du Laboratoire de Toxicologie à la Préfecture de police, 49, rue de Bellechasse. Paris, 7e.

OLIVIER (**Louis**), Docteur ès Sciences, Directeur de la *Revue générale des Sciences pures et appliquées*, 22, rue du Général-Foy. Paris, 8e.

OLLIVIER (**A.**), Ingénieur civil, 5, rue Littré. Paris, 6e.

ONDE, Professeur au Lycée Henri-IV, 41, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

OSMOND (**Floris**), Ingénieur civil, 83, boulevard de Courcelles. Paris, 8e.

OUDIN (Dr), 12, rue de Belzunce. Paris, 16e.

OUMOFF (**Nicolas**), Professeur de Physique à l'Université de Moscou (Russie).

PAILLARD (**Gaston**), Licencié ès sciences, 36, rue Voltaire, à Levallois-Perret (Seine).

PAILLÉE (**Raphaël**), Pharmacien de 1re classe, Membre de la Société chimique de Paris, à Arthon-en-Retz (Loire-Inférieure).

PAILLOT, Chef des Travaux pratiques de Physique à la Faculté des Sciences, 53, boulevard Montebello, à Lille (Nord).

PAINLEVÉ (**Paul**), Membre de l'Institut, 33, rue d'Assas. Paris, 6e.

PALMADE, Professeur au Lycée de Montpellier (Hérault).

PALMADE (**F.**), Chef de bataillon au Génie, Chef du Génie à Bourges (Cher).

PAQUIER (**Marc**), Constructeur mécanicien, 5, boulevard Sébastopol. Paris, 1er.

PASSA, Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Marseille (Bouches-du-Rhône).

PASTOURIAUX, Préparateur à l'École Normale supérieure d'Enseignement primaire, à Saint-Cloud (Seine-et-Oise).

PATENT OFFICE LIBRARY, à Londres, 25, Southampton Buildings, W. C. (Angleterre).

MM.

PATTE (**Lucien**), Professeur au Lycée, 12, rue Louis-Joblot, à Bar-le-Duc (Meuse).

PAVLIDÈS (**Démosthènes**), Docteur en Médecine.

PAULSEN (**Adam-Frédéric-Vivet**), Directeur de l'Institut météorologique de Danemark, à Copenhague (Danemark).

PAYN (**John**), Directeur de l'*Eastern Telegraph C°*, au Caire (Egypte).

PAYRARD (**Henri**), Censeur du Lycée de Nantes (Loire-Inférieure).

PÉLABON (**H.**), Chargé de Conférences de Chimie à la Faculté des Sciences de Lille (Nord).

PELISSIER (**Eugène**), Maître de Conférences à l'Institut national agronomique, Professeur à l'École coloniale, 88 *bis*, boulevard Latour-Maubourg. Paris, 7e.

PELLAT (**H.**), Professeur à la Faculté des Sciences, 23, avenue de l'Observatoire. Paris, 6e.

PELLET (**Auguste-Claude-Eliacin**), Professeur à la Faculté des Sciences, 30, rue Pascal, à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

PELLIN (**Philibert**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Constructeur d'instruments d'Optique et de précision, successeur de Jules Duboscq, 21, rue de l'Odéon. Paris, 6e.

PEREIRA (**Alfredo**), Pharmacien en chef de l'Hôpital *Condé de Ferreira*, à Porto (Portugal).

PÉRIDIER (**Julien**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 20, rue du Regard. Paris, 6e.

PERNIN (**René**), 60, rue des Tournelles. Paris, 3e.

PEROT (**Alfred**), Directeur du Laboratoire d'Essais au Conservatoire National des Arts et Métiers, 292, rue Saint-Martin. Paris, 3e.

PÉROUX (**E.**), Capitaine d'Infanterie de Marine en retraite, 11, rue des Canus, à Maisons-Laffitte (Seine-et-Oise).

PERREAU, Professeur à la Faculté des Sciences de Besançon, Bregille Besançon (Doubs).

PERRIER, Capitaine d'Artillerie, détaché à l'État-Major de l'Armée (Service géographique, mission de l'Équateur), 140, rue de Grenelle. Paris, 7e.

PERRIN (**Jean**), Chargé de Cours à la Faculté des Sciences, 18, boulevard Arago. Paris, 13e.

PESSEMESSE, Professeur au Lycée, 14, rue Lezerac, à Châteauroux (Indre).

PETIT (**G.-E.**), Ingénieur des Télégraphes, Chargé des Études relatives à la Télégraphie sans fil, 205, boulevard Raspail. Paris, 14e.

PETIT (**Paul**), Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy (Meurthe-et-Moselle).

PETIT (**Paul**), Professeur au Lycée de Foix (Ariège).

PETITEAU (**Marcel**), Professeur au Lycée, 13, rue de Strasbourg, à Nantes (Loire-Inférieure).

PETROVITCH (**Michel**), Professeur à l'Université, 24, Kossantch Venac, à Belgrade (Serbie).

MM.

PETROVITCH (**Serge**), Colonel d'Artillerie, Professeur adjoint à l'Académie d'Artillerie Michel, Sabalkanshy Prospect, 17, Log. 4, à Saint-Pétersbourg (Russie).

PEYRUSSON (**Édouard**), Professeur de Chimie et de Toxicologie à l'École de Médecine et de Pharmacie, 17, chemin Petit-Tour, à Limoges (Haute-Vienne).

PFAUNDLER (**Léopold**), Professeur à l'Université, Directeur de l'Institut physique, Halbartgasse, 1, Gratz (Autriche).

PHASMANN (**Augustin**), Maire de Saint-Mihiel (Meuse).

PHILBERT, ancien Receveur des Télégraphes, 58, rue d'Antrain, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

PHILIPPE (**A.**), Professeur au Lycée, 5, rue de l'Abattoir, à Bourges (Cher).

PHILIPPON (**Paul**), Professeur au Lycée, 24, rue Quesnel-Morinière, à Coutances (Manche).

PICARD (**Frédéric**), Docteur en médecine, Villa Rivoire, à Cannes (Alpes-Maritimes).

PICHON, Professeur de Physique au collège de Perpignan (Pyrénées-Orientales).

PICOU (**R.-V.**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 41, rue Saint-Ferdinand. Paris, 17e.

PIEUX, Professeur à l'École normale d'Instituteurs, à Alberville (Savoie).

PILLEUX, Ingénieur électricien, villa d'Alésia, 5, 111 *bis*, 111 *ter*, rue d'Alésia. Paris, 14e.

PILLEUX (**André**), Capitaine d'Artillerie à la fabrique d'armes de Puteaux (Seine).

PILLOT (**Arthur**), Professeur au Lycée, 56, cours d'Orléans, à Charleville (Ardennes).

PILTSCHIKOFF (**Nicolas**), Professeur à l'Institut technique de Karkow (Russie).

PIONCHON, Professeur à la Faculté des Sciences, 1, rue Denfert-Rochereau, à Grenoble (Isère).

PIROT (l'abbé), Chanoine honoraire, Supérieur de l'Institution Sainte-Marie, à Bourges (Cher).

POCHETTINO (**C.-Alfredo**), Instituto Fisico della R. Universita, à Rome (Italie).

POINCARÉ (**Antoni**), Inspecteur général des Ponts et Chaussées en retraite, 10, rue de Babylone. Paris, 7e.

POINCARÉ (**Henri**), Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 63, rue Claude-Bernard. Paris, 5e.

POINCARÉ (**Lucien**), Inspecteur général de l'Instruction publique, 130, rue de Rennes. Paris, 6e.

POINTELIN, Professeur de Physique au Lycée et à l'École de Médecine, 125, route de Paris, à Amiens (Somme).

POLLAK-WSCIEKLICA (Mme **Marcella**), Licenciée ès sciences physiques, place Macé, à Antibes (Alpes-Maritimes).

MM.

POLLARD (**Jules**), Directeur du Génie maritime, Directeur de l'Établissement d'Indret, par Basse-Indre (Loire-Inférieure).

POMEY (**J.-B.**), Ingénieur des Télégraphes, 140, boulevard Raspail. Paris, 6e.

PONSELLE (**Georges**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 114, avenue de Wagram. Paris, 17e.

PONSONNARD (**Abel**), Sous-Inspecteur au Service du matériel de la traction des Chemins de fer de l'Est, 168, rue Lafayette. Paris, 10e.

PONSOT (**A.**), Chargé de Cours à la Faculté des Sciences, Institut physique, 50, rue Gauthier-de-Châtillon, à Lille (Nord).

PONT, Professeur au Lycée Hoche, 21, avenue de Picardie, à Versailles (Seine-et-Oise).

POPOFF (**Alexandre**), Professeur à l'École des Torpilleurs marins, Classe des officiers de Marine, à Cronstadt (Russie).

POPP (**Victor**), ancien Administrateur-Directeur de la Compagnie des Horloges pneumatiques, 9, rue Margueritte. Paris, 17e.

POSTEL-VINAY, Ingénieur, 219, rue de Vaugirard. Paris, 15e.

POTIÉ, Ingénieur des Arts et Manufactures aux Papeteries du Timbre, à Thiers (Puy-de-Dôme).

POUTEAUX, Constructeur, 115, rue de la Préfecture, à Dijon (Côte-d'Or).

POZZI-ESCOT (**E.**), Chimiste, 23, rue de Jéricho, à Malzeville (Meurthe-et-Moselle).

PRÉAUBERT (**E.**), Professeur honoraire, 13, rue Proust, à Angers (Maine-et-Loire).

PRÉOBRAJENSKY (**Pierre**), Bolchaia Grousinskaia, 10 A, à Moscou (Russie).

PRÉSIDENT (le) de la Société de Physique de Londres (Angleterre).

PRÉSIDENT (le) de la Société de Physique de Saint-Pétersbourg (Russie).

PRETORIANO (**Marin**), Professeur à l'École militaire de Craïova (Roumanie).

PRÉVOST (Baron **Henri**), 17, rue Alphonse-de-Neuville, Paris.

PRIEUR (**Albert**), Industriel, 76, boulevard Malesherbes. Paris, 8e.

PROUMEN (**Henri**), Ingénieur civil des Mines, Professeur de Physique à l'École industrielle, 27, rue d'Idalie, Ixelles-Bruxelles (Belgique).

PRZIBRAM (**Karl**), Dr Privat-docent de Physique à l'Université, Partering 18, à Vienne I (Autriche).

PUPIN, Docteur en Médecine, 27, quai de la Tournelle. Paris, 5e.

PUYFONTAINE (Comte **de**), 38, avenue Friedland. Paris, 8e.

QUESNEVILLE (Dr), Professeur agrégé à l'École supérieure de Pharmacie, 1, rue Cabanis. Paris, 14e.

RALLET, Professeur à l'Université de Jassy (Roumanie).

RAMEAU (l'abbé), Professeur de Physique à l'Institution Saint-Cyr, à Nevers (Nièvre).

RANQUE (**Paul**), Docteur en Médecine, 13, rue Champollion. Paris, 5e.

RAPS (**Auguste**), Professeur, Docteur ès Sciences, Directeur de la Maison Siemens Halske, Ulmen Alle, 14, Berlin W. (Allemagne).

MM.

RAU (**Louis**), Administrateur délégué de la Compagnie Continentale Edison, 7, rue Montchanin. Paris, 17e.

RAVEAU (**Camille**), Physicien au Laboratoire d'Essais du Conservatoire national des Arts et Métiers, 61, boulevard Sébastopol. Paris, 1er.

RAYET. Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux (Gironde).

RAYLEIGH (**Lord**), F. R. S., Professeur à l'Institution royale, Terling Place, à Witham, Essex (Angleterre).

RAYMOND (**Eugène**), Ingénieur principal de la Compagnie des Messageries maritimes, à la Ciotat (Bouches-du-Rhône).

REBOUL, Professeur au Lycée de Chartres (Eure-et-Loir).

RECHNIEWSKI (**W.-C.**), Ingénieur électricien, 1, avenue de l'Alma. Paris, 8e.

RÉGNARD (Dr **P.**), Membre de l'Académie de Médecine, Directeur de l'Institut agronomique, 222, boulevard Saint-Germain. Paris, 7e.

REGNIER (**Joseph**), Constructeur d'instruments de Physique et de Chimie, 10, rue Victor-Cousin. Paris, 5e.

REMY (**Léon-Émile**), Professeur au Lycée de Rennes (Ille-et-Vilaine).

RENAULT (**Albert**), Chimiste, 13, rue Paul-Louis-Courier. Paris, 7e.

REVOY, Professeur au Lycée Gay-Lussac, 25, avenue des Bénédictins, à Limoges (Haute-Vienne).

REY (Mme), Professeur au Lycée de jeunes filles, 98, rue Origet, à Tours (Indre-et-Loire).

REY PAILHADE (**J. de**), Ingénieur civil des Mines, 18, rue Saint-Jacques, à Toulouse (Haute-Garonne).

RIBAN (**Joseph**), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, Professeur à l'École des Beaux-Arts, 85, rue d'Assas. Paris, 6e.

RIBIÈRE (**Charles**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées (service des Phares), 1, rue Edmond-About. Paris, 16e.

RICARD (Dr **E.**), Chirurgien de l'Hôpital, 6, impasse Voltaire, à Agen (Lot-et-Garonne).

RICARDO YESARES BLANCO, Ingénieur électricien, Almansa, 16, Hôtel, à Madrid (Espagne).

RICHARD (**Jules**), Ingénieur-Constructeur, 25, rue Mélingue. Paris, 19e.

RICHARD (**Pierre-Joseph**), Lieutenant au 4e régiment du Génie, compagnie 7-4, 5, rue de l'Abattoir, à Belfort (Territoire de Belfort).

RICHET (**Ch.**), Professeur à la Faculté de Médecine, 15, rue de l'Université. Paris, 7e.

RIEFFEL (**A.**), 3, rue des Princes, à Monaco (Principauté de Monaco).

RIGOLLOT (**Henri**), Chargé de Cours de Physique industrielle à l'Université, 43, chemin des Grandes-Terres, à Lyon (Saint-Just) (Rhône).

RIVIÈRE (**Charles**), Professeur au Lycée Saint-Louis, 30, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

RIVIÈRE, Docteur en Médecine, 25, rue des Mathurins. Paris, 9e.

ROBERT (**A.-C.**), Ingénieur-Conseil de l'Institut Pasteur, 54, rue du Four. Paris, 6e.

MM.

ROBERT (**Charles-Marie**), Professeur au Collège, rue Nationale, à Clermont-l'Hérault (Hérault).

ROCHEFORT (**Octave**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Directeur technique de la Société anonyme Mors, 48, rue du Théâtre. Paris, 15e.

RODALLEC, Professeur au Collège de Morlaix (Finistère).

RODDE (**Ferd.**), 18, rue Dervic. Paris, 18e.

RODDE (**Léon**), 107, rua do Ouvidor, à Rio-de-Janeiro (Brésil).

RODOCANACHI (**Emmanuel**), 54, rue de Lisbonne. Paris, 8e.

ROGER (**Albert**), rue Croix-de-Bussy, à Épernay (Marne).

ROGOVSKY (**Eugène**), Professeur à l'Université de Kharkow (Russie).

ROGOW (**Moissej**), Chimiste diplômé de la Faculté des Sciences de Saint-Pétersbourg, Georgenstrasse, 35, à Munich (Bavière).

ROJDESTWENSKY (**Dmitri**), Laborant à l'Institut de Physique de l'Université de Saint-Pétersbourg (Russie).

ROLLAND (**Étienne**), Professeur au Lycée, 32, route de Bordeaux, à Poitiers (Vienne).

ROMAGNY (**Mlle Lucie-Louise**), Professeur de Sciences à l'École normale d'Institutrices, à Vannes (Morbihan).

ROMILLY (**Paul Worms de**), Inspecteur général des Mines, 7, rue Balzac. Paris, 8e.

ROPIQUET, Pharmacien, rue Jules-Barni, à Amiens (Somme).

ROQUES (**Dr C.**), Aide de clinique électrothérapique à la Faculté de Médecine, 29, rue Saint-François, à Bordeaux (Gironde).

ROSENSTIEHL, Chimiste, Directeur de l'Usine Poirrier, 61, route de Saint-Leu, à Enghien (Seine-et-Oise).

ROSSET (**Georges**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 4, rue Alboni. Paris, 16e.

ROSTAING (**Évariste-Léon-Benoît**), Chef d'escadron d'Artillerie, en retraite, 9, impasse Crèvecœur, à Bourg (Ain).

ROTHÉ (**Edmond**), Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, 21, rue Malzéville, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

ROTHSCHILD (baron **Edmond de**), 41, rue du Faubourg-Saint-Honoré. Paris, 8e.

ROUBAULT, Professeur au Lycée d'Angoulême (Charente).

ROUDET (**L.**), Professeur au Lycée de Nancy (Meurthe-et-Moselle).

ROUMAILLAC, Docteur en Médecine, à Captieux (Gironde).

ROUSSEAU, Professeur à l'Université, 20, rue Vauthier, à Ixelles-Bruxelles (Belgique).

ROUSSELET, Proviseur du Lycée de Saint-Étienne (Loire).

ROUSSELOT (l'abbé), Professeur à l'Institut catholique, 74, rue de Vaugirard. Paris, 6e.

ROUTIN (**Joseph-Louis**), ancien Élève de l'École Polytechnique, Ingénieur Conseil, 15, rue Émile-Zola, à Lyon (Rhône).

ROUX (**Gaston**), Ingénieur-Conseil, Directeur du Bureau de Contrôle des installations électriques, 12, rue Hippolyte-le-Bas. Paris, 9e.

MM.

ROY (**Georges-Eugène**), Chef des Travaux de Physique à la Faculté des Sciences, 11 *bis*, rue Fleutelot, à Dijon (Côte-d'Or).

ROYCOURT (**Eugène**), Constructeur électricien, successeur de M. Bonetti, 69, avenue d'Orléans. Paris, 14e.

ROZET (Mlle **Thérèse**), Professeur au Lycée de jeunes filles, 4, rue du Chilon, Le Havre (Seine-Inférieure).

ROZIER (**F.**), Docteur en Médecine, 10, rue du Petit-Pont. Paris, 5e.

RYTKATCHEFF (Général), Directeur de l'Observatoire Physique Central Nicolas, Wassiliewski Ostrow, 33, ligne n° 2, à Saint-Pétersbourg (Russie).

SACERDOTE (**Paul**), Ancien Élève de l'École Normale supérieure, Professeur agrégé au Collège Sainte-Barbe, 97, boulevard Saint-Michel. Paris, 5e.

SADOWSKY (**Alexandre**), Professeur de Physique à l'Université impériale, à Dorpat (Russie).

SAGNAC (**Georges**), Chargé de Cours à la Faculté des Sciences, 4, rue Boissonnade, à Paris, 14e.

SAINTE-CLAIRE DEVILLE (**Émile**), Ingénieur à la Compagnie parisienne du Gaz, 73, rue Berthier. Paris, 17e.

SAINTE-CLAIRE DEVILLE (**Henri**), ancien Directeur des Manufactures de l'État, Administrateur délégué de la Société anonyme des anciennes salines domaniales de l'Est, 95, rue de Courcelles. Paris, 17e.

SAINTIGNON (**F. de**), Maître de forges à Longwy (Meurthe-et-Moselle).

SAIVRE (**Maurice de**), Ingénieur diplômé de l'École supérieure d'Électricité, 52, rue de Vaugirard. Paris, 6e.

SALADIN (**Édouard**), Ingénieur civil des Mines, chez MM. Schneider et Cie, au Creusot (Saône-et-Loire).

SALET (**P.**), attaché à l'Observatoire de Paris, 120, boulevard Saint-Germain. Paris, 6e.

SALLES (**Adolphe**), 1, rue Rabelais. Paris, 8e.

SALLES (**Édouard**), Licencié ès Sciences Physiques, attaché au Laboratoire de recherches physiques de la Sorbonne, 58, rue de Clichy. Paris, 9e.

SALMON, Professeur au Lycée, 15, rue du Mûrier-d'Espagne, à Nîmes (Gard).

SALTYKOW, Professeur de Mécanique théorique à l'Institut Polytechnique de Kiew (Russie).

SALVAING (**Félix**), Professeur au Collège, rue Paul-Riquet, à Perpignan (Pyrénées-Orientales).

SAMANA DE CHIKLI (**A.**), 13, rue Sidi-Sofian, à Tunis (Tunisie).

SANDOZ (**Albert**), Préparateur des Travaux pratiques de Physique à la Faculté de Médecine, 119 *bis*, rue Notre-Dame-des-Champs. Paris, 6e.

SANTAIS (l'Abbé), Vicaire à Saint-Romain, 99, boulevard Beauvoisine, à Rouen (Seine-Inférieure).

SANTERRE, 23, quai d'Orsay. Paris, 7e.

SARASIN (**E.**), Docteur ès Sciences, Grand Saconnex, à Genève (Suisse).

MM.

SARDING (**Jean-Marie-Auguste**), Préparateur de Physique à la Faculté des Sciences de Toulouse (Haute-Garonne).

SARRAN (**E.**), Professeur au Lycée, 20, cours Pasteur, à Bordeaux (Gironde).

SARAZIN, Professeur à l'École des Arts et Métiers et à l'École de Médecine, 22, rue Paul-Bert, à Angers (Maine-et-Loire).

SAUTTER (**Gaston**), Ingénieur, 26, avenue de Suffren. Paris, 15e.

SAUVAGE (**E.**), Postes et Télégraphes, au Cap Saint-Jacques (Cochinchine).

SCHAFFERS (R. P. **Victor**), S. J., Docteur ès sciences physiques et mathématiques, Professeur au Collège de la Compagnie de Jésus, 11, rue des Récollets, à Louvain (Belgique).

SCHILLER (**Nicolas**), Membre du Conseil ministériel de l'Instruction Publique, Serguiewskaia 67, à Saint-Pétersbourg (Russie).

SCHOOP (**Max-Ulrich**), Ingénieur Électrochimiste, 130, rue Henri-Litoff, à Bois-Colombes (Seine).

SCHÜRR, Docteur ès sciences, Professeur au Lycée, 60, rue Pont-de-Garonne, à Agen (Lot-et-Garonne).

SCIAMA, Ingénieur civil des Mines, Directeur de la Maison Breguet, 15, rue Bizet. Paris, 16e.

SCOBELZINE (**Wladimir**), Professeur au Polytechnicum, Sosnowka, à Saint-Pétersbourg (Russie).

SEBERT (le Général), Membre de l'Institut, 14, rue Brémontier. Paris, 17e.

SECRÉTAN (**G.**), Ingénieur-Opticien, 13, place du Pont-Neuf. Paris, 1er.

SECRETARY OF THE BOARD OF EDUCATION, Londres W. C. (Angleterre).

SECTION TECHNIQUE DE L'ARTILLERIE représentée par M. Raibaud, Capitaine d'artillerie, adjoint à l'atelier de précision, 1, place Saint-Thomas-d'Aquin. Paris, 7e.

SEE (**Thomas-Jefferson-Jackson**), A. M. Ph. D. Bexol, Professor Mathematics U. S. Novy, Naval Observatory Mare Island, California (U. S. A.)

SEDZIAK (**François**), Ingénieur Électricien, Directeur de Dours Draft Boiter and Machine Co, 23d Corner of Papin street, à Saint-Louis, Mo. (U. S. A.).

SEIGNIER (**Pierre**), Licencié ès Sciences, Professeur au Collège de Mauriac (Cantal).

SÉGUIN (**Jules-Auguste**), Chef de Service aux Ateliers et Chantiers de la Loire (Établissement de Saint-Denis), Chef mécanicien de garantie à bord du paquebot *Romania*, à Constanza (Roumanie).

SELIGMANN-LUI, Directeur-Ingénieur des Télégraphes, 78, rue Mozart. Paris, 16e.

SELIGMANN (**Max**), Professeur de Physique à l'Athénée Royal, 61, rue de la Culture, à Bruxelles (Belgique).

SELLA (**Alfonso**), Professeur « Istituto fisico della R. Universita », à Rome (Italie).

SENTIS, Professeur au Lycée, 17, boulevard de Bonne, à Grenoble (Isère).

SERPOLLET, Ingénieur, 11, rue de Stendhal. Paris, 20e.

MM.

SERRÉ-GUINO, Examinateur honoraire à l'École de Saint-Cyr, 114, rue du Bac. Paris, 7e.

SHORTER (**Lewis-R.**), B. Sc. de l'Université de Londres, 55, Campden Hill Road, Kensington London W. (Angleterre).

SIEGLER, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Ingénieur en chef de la voie des Chemins de fer de l'Est, 48, rue Saint-Lazare. Paris, 9e.

SIEGLER (**Jean**), Ingénieur des Mines, 14, rue Gambetta, à Saint-Étienne (Loire).

SIGALAS (Dr **C.**), Professeur de Physique à la Faculté de Médecine et de Pharmacie, 67, rue de la Teste, à Bordeaux (Gironde).

SIMON (**L.-J.**), Sous-Directeur du Laboratoire de Chimie à l'École normale supérieure, 15, rue Vauquelin. Paris, 5e.

SIRE (**G.**), Correspondant de l'Institut, à Besançon-Mouillière.

SIRVENT, Professeur au Lycée Saint-Louis, 73, rue de Rennes. Paris, 6e.

SISSINGH (**R.**), Docteur, Professeur à l'Université, Oosterpark, 79, à Amsterdam (Hollande).

SMOLUCHOWSKI DE SMOLAN (le Chevalier **M.**), Docteur ès Sciences, Professeur à l'Université Léopole, Duglosza, 8, rue Léopole-Lemberg (Autriche).

SOCIEDAD DE INGENIEROS, Apatardo Corres, n° 981, à Lima (Pérou).

SOISSON (**Guillaume**), Professeur de Physique à l'École industrielle et commerciale, 1, rue de l'Athénée, à Luxembourg (Grand-Duché de Luxembourg).

SOKOLOW (**Alexis**), Professeur de Physique à l'Université de Moscou (Russie).

SOLVAY (**Ernest**), Industriel, 43, rue des Champs-Élysées, à Bruxelles (Belgique).

SORBIER (**J.**), Professeur au Collège de Bône (Algérie).

SORET (**Adrien**), Professeur au Lycée, 11, rue Edmond-Morin, au Havre (Seine-Inférieure).

SOYER (**Auguste**), Agrégé, Professeur au Lycée de Tournon (Ardèche).

SPARRE (le Comte **Magnus-Louis-Marie de**), Doyen de la Faculté catholique des Sciences, 7, avenue de l'Archevêché, à Lyon (Rhône).

SPRING (**W. V.**), Membre de l'Académie Royale, Professeur à l'Université, 32, rue Beckmann, à Liége (Belgique).

STACKELBERG (baron **Édouard de**). Reval Dom Ritterhaus (Russie).

STAPFER (**Daniel**), Ingénieur, boulevard de la Mayor, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

STEPANOFF (**A.**), Ancien Professeur de Physique, Lesnoï, rue Kropotkinskaïa, n° 4, à Saint-Pétersbourg (Russie).

STIASSNIE (**Maurice**), Opticien, 204, boulevard Raspail. Paris, 14e.

STRAUSS (Le Colonel **S.**), Directeur du Génie, à Toul (Meurthe-et-Moselle).

STREET (**Charles**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 13, rue Legendre. Paris, 17e.

STROUHAL (**Vincent**), Ph., Docteur, Professeur à l'Université de Bohême, Conseiller à la Cour, Prague, Clémentinum, Institut de Physique (Autriche).

MM.

STSCHEGLAYEF (**Woldemar**), Professeur de Physique à la Haute-École technique de Moscou (Russie).

SULZER (**E.-C.**), Docteur en Médecine, 22, rue de Tocqueville. Paris, 17e.

SUZOR (**Georges-W.**), Ingénieur, Plaques, Pellicules et Papiers photographiques, Esunohazu Yodobaschi, Machi Shinjuku, Tokio (Japon).

SWYNGEDAUW (**R.**), Professeur de Physique et d'Électricité industrielle à la Faculté des Sciences, 1, rue des Fleurs, à Lille (Nord).

SYRMEN (**Louis-Pierre**), Professeur au Collège de Sarlat (Dordogne).

TAILLEFER (**André**), ancien Élève de l'École Polytechnique, 215, boulevard Saint-Germain. Paris, 7e.

TANGL (**Charles**), Professeur à l'Université, Monostori ut 72, à Kolozvár (Hongrie).

TARIEL (**Paul**), Docteur en Médecine, 19, rue Kléber, à Issy-les-Moulineaux (Seine).

TARRADE, Attaché au Bureau international des Poids et Mesures, au Pavillon de Breteuil, à Sèvres (Seine-et-Oise).

TEISSERENC DE BORT (**Léon**), Météorologiste au Bureau central météorologique, Directeur de l'observatoire de Météorologie dynamique, 33, rue Dumont-d'Urville. Paris, 16e.

TEPLOFF (**N.**), Colonel du Génie impérial russe, rue Vladimir-Kaies, 15, Maison Friedrichs, à Saint-Pétersbourg (Russie).

TERADA (**Torahiko**), Professeur au Collège des Sciences, à Tokio (Japon).

TERMIER, Ingénieur des Mines, Professeur à l'École nationale des Mines, 164, rue de Vaugirard. Paris, 15e.

TERRIER, Professeur au Lycée, 38, rue du Bel-Air, à Laval (Mayenne).

THÉLIER (**Marcel**), 9, avenue de Messine. Paris, 8e.

THIESEN (Dr **Max**), Professeur Physikalischen Technische Reichsanstalt, Charlottenburg-Berlin (Allemagne).

THOMAS, Professeur à l'École supérieure des Sciences d'Alger (Algérie).

THOMPSON (**Silvanus-P.**), Professeur à Finsbury Technical College, Morland, Chislett Road, West Hampstead, Londres N.-W. (Angleterre).

THOUVENEL (**N.**), Professeur au Lycée Charlemagne, 19, boulevard Morland. Paris, 4e.

THOVERT, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Grenoble, chemin Saint-Jean, à la Tronche (Isère).

THURNEYSSEN (**J.**), ancien Élève de l'École Polytechnique, successeur de la maison Alvergniat-Chabaud, 58, rue Monsieur-le-Prince. Paris, 6e.

TIAN, Préparateur de Physique industrielle à la Faculté des Sciences, 26, rue de la Savonnerie, Marseille (Bouches-du-Rhône).

TIMIRIAZEFF, Professeur à l'Université et à l'Académie agronomique de Moscou (Russie).

TISSIER, Professeur au Lycée Voltaire, 1, rue Mirbel. Paris, 5e.

TISSOT (Mme), 2, cité d'Antin, à Brest (Finistère).

MM.

TISSOT, Lieutenant de vaisseau, Professeur de Physique à l'École Navale, 2, Cité d'Antin, à Brest (Finistère).

TOMBECK, Docteur ès Sciences, 59, boulevard Pasteur. Paris, 15e.

TONARELLI, Proviseur du Lycée de Chambéry (Savoie).

TORCHEBEUF (**Ch.**), Constructeur d'instruments de Physique, 15, rue de l'Estrapade. Paris, 5e.

TOUANNE (**G. de la**), Ingénieur des Télégraphes, 80, rue Bonaparte. Paris, 6e.

TOUPOT (**J.-E.**), Curé de Robert-Espagne (Meuse).

TOUREN (**Charles**), Professeur au Collège Rollin, 56, rue Gay-Lussac. Paris, 5e.

TOURRIOL (**Jean**), Professeur au Lycée, 19, rue Saint-Léonard, à Angers (Maine-et-Loire).

TRABAREL, Professeur de Physique au collège de Perpignan (Pyrénées-Orientales).

TRAVERS (**J.**), 37, boulev. de la Tour-d'Auvergne, à Rennes (Ille-et-Vilaine).

TRIPIER (Dr), 8, rue Vignon. Paris, 9e.

TRIPIER, Ingénieur Électricien, 17, rue Alphonse-de-Neuville. Paris, 17e.

TRIPPE (**Paul**), Professeur au Lycée, 15, rue de la Sous-Préfecture, à Roanne (Loire).

TROOST, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, 84, rue Bonaparte. Paris, 6e.

TSCHERNING (Dr **Marius**), Directeur du Laboratoire d'Opthalmologie à la Faculté des Sciences, 15, rue de Mézières. Paris, 6e.

TULEU (**Charles**), Ingénieur, 58, rue d'Hauteville. Paris, 10e.

TURPAIN (**Albert**), Professeur adjoint à la Faculté des Sciences, 95, rue de la Tranchée, à Poitiers (Vienne).

UCHARD (**A.**), Chef d'escadron d'Artillerie, 33, rue Voltaire, à Brest (Finistère).

ULLMANN (**Jacques**), Constructeur électricien, 16, boulevard Saint-Denis. Paris, 10e.

UNIVERSITÉ DE SYDNEY (**New South Wales**).

VAGNIEZ (**Édouard**), 14, rue Lemercier, à Amiens (Somme).

VAISSE (**Élie-Émile-Samuel**), Professeur au Collège d'Embrun (Hautes-Alpes).

VANDEVYVER-GRAU (**L.-N.**), Docteur ès sciences, Professeur à l'Université, 63, boulevard de la Citadelle, à Gand (Belgique).

VARENNE (**de**), 7, rue de Médicis. Paris, 6e.

VARIN (l'abbé), Professeur à l'École Saint-Sigisbert, à Nancy (Meurthe-et-Moselle).

VARRET (**René**), Ingénieur-électricien, Constructeur de machines électriques, 81, boulevard Voltaire. Paris, 11e.

VASSEUR (**Alfred**), villa Les Primevères, à Beau-Soleil (Alpes-Maritimes).

MM.

VAUGEOIS (**Jean-Georges**), Ingénieur électricien, Fabricant d'accumulateurs, 20, rue du Congrès, à Asnières (Seine).

VAUTIER (**Théodore**), Professeur adjoint de Physique à la Faculté des Sciences, 30, quai Saint-Antoine, à Lyon (Rhône).

VAYSSIÈRES (**Louis**), Professeur au Lycée, 35, boulevard Jeu de Paume, à Montpellier (Hérault).

VEILLON (**Henri**), Docteur en Philosophie, Professeur à l'Université, 27, rue Euler, à Bâle (Suisse).

VELTER (**Pierre-Jules-Edmond**), Ingénieur des Arts et Manufactures, 42, rue Falguière. Paris, 15e.

VENOT (Mlle **Anne-Marie-Marguerite**), Professeur agrégé des Sciences au Lycée de jeunes filles, 18, cours Lafayette, à Lyon (Rhône).

VERNIER (**Victor**), Profr au Lycée, 44, rue de Berlier, Dijon (Côte-d'Or).

VERNIER, Maître Répétiteur au Lycée Louis-le-Grand, 123, rue Saint-Jacques. Paris, 5e.

VICENTINI (**Giuseppe**), Professeur de Physique à l'Université de Padoue (Italie).

VIDAL (**Gaston**), Professeur au Collège, 33, avenue Denfert-Rochereau, à Auxerre (Yonne).

VIÉ (**Frédéric**), Ingénieur, ancien Élève de l'École Polytechnique, à l'Institut Pasteur, à Lille (Nord).

VIEILLE, Membre de l'Institut, Directeur des Poudres et Salpêtres, 12, quai Henri-IV. Paris, 4e.

VIGNON (**Léo**), Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université, Institut de Chimie, rue de Béarn, à Lyon (Rhône).

VILLARD (**P.**), Docteur ès Sciences, 45, rue d'Ulm. Paris, 5e.

VILLET (**Paul**), Directeur des Tabacs, à la Manufacture des Tabacs, à Riom (Puy-de-Dôme).

VILLIERS (**Antoine**), Professeur à l'École supérieure de Pharmacie, 30, avenue de l'Observatoire. Paris, 14e.

VINCENT, Professeur au Lycée Saint-Louis, 26, rue de Staël. Paris, 15e.

VINCENT (l'Abbé), Professeur à l'Institution Saint-François-de-Sales, à Alençon (Orne).

VIOLET (**Léon**), 167, rue de Rennes. Paris, 6e.

VIOLLE, Membre de l'Institut, Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers, 89, boulevard Saint-Michel. Paris, 5e.

VOIGT, Professeur honoraire du Lycée de Lyon, à Géanges, par Saint-Loup-de-la-Salle (Saône-et-Loire).

VOIGT (**Woldemar**), Professeur à l'Université de Gœttingen (Allemagne).

VOISENAT (**Jules**), Ingénieur en Chef des Télégraphes, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

VOLTERRA (**Vito**), Professeur de Physique mathématique à l'Université, via in Lucina, 17, à Rome (Italie).

VORGES (**Henry de**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur électricien, 8, rue de l'Évêché, à Soissons (Aisne).

MM.

VOUILLEMIN, Capitaine d'Artillerie, officier d'ordonnance du général commandant le 15e corps d'Armée, 353, rue Paradis, à Marseille (Bouches-du-Rhône).

VUILLET (**Eugène**), Professeur à l'École normale de Grenoble (Isère).

WAALS (**VAN DER**), Professeur à l'Université d'Amsterdam (Hollande).

WAHA (**de**), Ancien Professeur de Physique, à Luxembourg (Grand-Duché de Luxembourg).

WALCKENAER (**Charles**), Ingénieur en chef des Mines, Professeur à l'École des Ponts et Chaussées, 218, boulevard Saint-Germain. Paris, 7e.

WALLON (**Étienne**), Professeur au Lycée Janson-de-Sailly, 65, rue de Prony. Paris, 17e.

WATTEVILLE (**C. de**), Docteur ès Sciences, 96, avenue Victor-Hugo. Paris, 16e

WEIL (**Albert**), Docteur, 21, rue d'Édimbourg. Paris, 8e.

WEINBERG (**Boris**), Privat docent de Physique à l'Université d'Odessa (Russie).

WEISS (Dr **Georges**), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur agrégé de Physique à la Faculté de Médecine, 20, avenue Jules-Janin. Paris, 16e.

WEISS (**Pierre**), Professeur à l'École Polytechnique de Zurich (Suisse).

WEISSMANN (**Gustave**), Ingénieur des Constructions civiles E.C.P., 47, rue de Boulainvilliers. Paris, 16e.

WENGLER (**Michel**), Docteur ès Sciences, Professeur de Physique au Gymnase à Echternach (Grand-Duché de Luxembourg).

WERLEIN (**Ivan**), Constructeur d'instruments d'Optique, 8, rue d'Ulm. Paris, 5e.

WEST (**Emile**), Ingénieur, 29, rue Jacques-Dulud, à Neuilly-sur-Seine.

WEYHER, Ingénieur, Administrateur-Directeur de la Société centrale de Construction de Machines, 36, rue Ampère. Paris, 17e.

WIEDEMANN (**Eilhard**), Professeur de Physique, à Erlangen (Allemagne).

WILLIAMS, Libraire, 14, Henrietta Street, Covent Garden, Londres W. C. (Angleterre).

WILLOT (**A.**), Licencié ès sciences, 24, rue Cassette. Paris, 6e.

WIND (**C.-H.**), Docteur Professeur de Mathématiques et de Mécanique (théorie), à l'Université d'Utrecht (Hollande).

WITKOWSKI (**Auguste**), Professeur de Physique, Laboratoire de Physique de l'Université de Cracovie (Autriche).

WITZ (**Aimé**), Ingénieur civil, Professeur aux Facultés catholiques, 29, rue d'Antin, à Lille (Nord).

WOLF (**Charles**), Membre de l'Institut, Astronome honoraire de l'Observatoire, Professeur honoraire à la Faculté des Sciences, 36, avenue de l'Observatoire. Paris, 14e.

WOLFF (Dr **Edmond**), Professeur à l'École de Médecine, 52, rue Bernard-Palissy, à Tours (Indre-et-Loire).

MM.

WOULFF (**Georges**), Professeur de Minéralogie à l'Université de Varsovie (Russie).

WUILLEUMIER (**H.**), Docteur ès Sciences, Ingénieur, 46, rue Lepic. Paris, 18e.

WYROUBOFF (**G.**), Professeur au Collège de France, 70, rue Lacépède. Paris, 5e.

YOUNÈS (**René**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur adjoint à l'Ingénieur en chef, Chemin de fer du Yunnan, par Laokay (Tonkin).

YVON (**P.**) Membre de l'Académie de Médecine, 26, avenue de l'Observatoire. Paris, 14e.

ZALACOSTAS (**Pierre-N.**), Directeur du Laboratoire de Chimie au Ministère des Finances, 15, rue d'Adrien, à Athènes (Grèce).

ZALCE (**Ramon-N.**), Photographe, 2, calle de Jazminez, 15, apartado postal n° 75, à Morella (Mexique).

ZAREMBA (**Stanislas**), Professeur à l'Université et Correspondant de l'Académie des Sciences de Cracovie, rue Biskupia, 5, à Cracovie (Autriche).

ZEEMAN, Professeur à l'Université, 158, Stadhouderstrase, à Amsterdam (Hollande).

ZEGERS (**Louis-L.**), Ingénieur des Mines du Chili, 1262, Augustinas, à Santiago (Chili).

ZEMPLÉN (**G.**), Docteur ès Sciences, Professeur agrégé à l'Université de Budapest (Hongrie).

ZENGER (**Charles-Venceslas**), Conseiller à la Cour, Membre de l'Académie des Sciences François-Joseph Ier, Professeur à l'École Polytechnique, Prague 7/III Palais Sobkovic (Autriche).

ZERVOS (**Paniotis**), Docteur ès Sciences mathématiques de l'Université d'Athènes, Professeur de Mathématiques, 1, rue Derbenion, à Athènes (Grèce).

ZETTER (**Charles**), Ingénieur des Arts et Manufactures, Directeur de la Compagnie française d'appareillage électrique, 16, rue Montgolfier. Paris, 3e.

ZILOFF (**Pierre**), Professeur de Physique à l'Université, allée de Jérusalem, 3 *i*, Varsovie (Russie).

ZIMMERN (**A.**), Dr, Ancien Interne des Hôpitaux, 19, rue Bassano, Paris, 16e.

ZIVY (**Louis**), Professeur de Physique, 17, rue Saint-Vincent-de-Paul. Paris, 10e.

Janvier 1906.

Prière d'adresser les rectifications et changements d'adresse à M. A. Sandoz, agent général de la Société, 119 bis, rue Notre-Dame-des-Champs (6e).

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

V. Crémieu. — Calorimètre Bunsen modifié pour des expériences de cours. 5
D'Arsonval. — Note sur le générateur autocompresseur d'oxygène et sur le chalumeau à lumière oxyacétylénique 9
G. Mékeer. — Nouveaux brûleurs de laboratoires et leur application au chauffage à température élevée 13
Adrien Guébhard. — Sur la fonction photographique 19
A. Turpain. — Appareil pour l'observation et l'enregistrement automatique des orages 33
H.-A. Lorentz. — La Thermodynamique et les théories cinétiques 35
M. Leblanc. — Expériences de M. Cooper Hewitt sur les tubes à vide 63
Paul Janet. — Sur les tendances et les recherches actuelles de l'Électrotechnique 89
Chaumat. — Les progrès récents de l'Électrochimie 115
H.-V. Picou. — Les principes généraux dans la construction des dynamos à courant continu 142
A. Hillairet. — Les moteurs électriques dans l'Industrie 151
Jumau. — État actuel de l'industrie des accumulateurs 228
P. Weiss. — Les progrès récents de l'éclairage électrique 267
G. de la Touanne. — État actuel de la Téléphonie 302
P. Weiss. — Les propriétés magnétiques de la pyrrhotine 335
P. Weiss et J. Kunz. — Les variations thermiques de l'aimantation de la pyrrhotine 392
E. Haudié. — Étude photométrique des images formées par les systèmes optiques 419
E. Haudié. — Détermination, au moyen d'un appareil photographique, du grossissement et du champ des lunettes galiléiques ou astronomiques 425
A. Blanc. — Sur les résistances de contact 430
Eugène Bloch. — Conductibilité des gaz issus d'une flamme 456
Blondel. — Sur le phénomène de l'arc chantant 464
V. Crémieu. — Recherches expérimentales sur la gravitation 485

PROCÈS-VERBAUX ET RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS.

SÉANCE DU 6 JANVIER 1905 ..... 1*

A. Guébhard. — Sur la fonction photographique dans ses rapports avec les phénomènes d'inversion 1*
P. Villard. — Remarques au sujet de la communication de M. *Guébhard*. 2*

Pages.

V. Crémieu. — Calorimètre de Bunsen employé pour diverses expériences de cours 3*
G. Berlemont. — Modifications aux trompes à mercure 4*
D'Arsonval. — Lumière oxyacétylénique de la Cie française de l'Acétylène dissous 4*
D'Arsonval. — Nouveau procédé de fabrication de l'acétylène comprimé au moyen du générateur autocompresseur de la Cie de l'Acétylène dissous. 4*
G. Méker. — Nouveaux brûleurs de laboratoire et leur application au chauffage à température élevée 5*
Rapport de la Commission des Comptes sur l'exercice 1902-1903 ..... 6*
Rapport de la Commission des Comptes sur l'exercice 1903-1904 ..... 8*

SÉANCE DU 20 JANVIER 1905 ..... 10*

D'Arsonval. — Allocution 11*
Thurneyssen. — Remarques au sujet de la communication de M. *Berlemont* 12*
P. Langevin. — Sur la théorie du magnétisme 13*
Ch.-Ed. Guillaume. — La physique des solides d'après les idées de M. Tammann 17*

SÉANCE DU 3 FÉVRIER 1905 ..... 18*

Guillet. — Entretien des corps vibrants 19*
Albert-Lévy et Pécoul. — Appareil automatique avertisseur d'oxyde de carbone 21*
Henri Abraham. — Frein synchronisant électromagnétique 21*
A. Guébhard. — Recherches expérimentales pour la représentation de la fonction photographique 22*
P. Villard. — Remarques au sujet de la communication de M. *Guébhard*. 23*
Ch.-Ed. Guillaume. — Remarques au sujet de la communication de M. *Guébhard* 24*

SÉANCE DU 17 FÉVRIER 1905 ..... 25*

P. Langevin. — Recherches récentes sur la théorie de la décharge disruptive. 25*
D'Arsonval. — Un téléphone hygiénique 29*
P. Villard. — Sur les rayons cathodiques 30*
Jean Perrin et P. Langevin. — Remarques au sujet de la communication de M. *P. Villard* 31*

SÉANCE DU 3 MARS 1905 ..... 32*

Charles Nordmann. — Enregistrement continu de l'ionisation atmosphérique. 32*
P. Langevin. — Remarques au sujet de la communication de M. *Charles Nordmann* 34*
De Kowalski. — Remarques au sujet de la communication de M. *Charles Nordmann* 35*
A. Guébhard. — Sur le silhouettage 35*
P. Curie. — Sur la radioactivité induite du radium 36*

Pages.

Victor Henri. — Remarques sur la communication de M. *P. Curie*..... 39*
Varin (l'abbé). — Soupape à mercure pour les trompes à eau..... 40*
Devaux-Charbonnel. — La capacité des longs câbles sous-marins.... ..... 40*

SÉANCE DU 17 MARS 1905..... 43*

A. Cotton. — Présentation du télescope de Foucault légué par M. de Romilly. 44*
Victor Henri. — Lois d'action des diastases..... 46*
H. Abraham. — Modèles de supports pour appareils de Physique..... 50*

SÉANCE DU 7 AVRIL 1905..... 51*

Pérot. — Description de deux appareils nouveaux du laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers : manomètre et appareil pour la vérification des cercles..... 52*
J. de Kowalski. — Sur le spectre d'émission de l'arc électrique à haute tension..... 54*

SÉANCE ANNUELLE. — Réunions des jeudi 27, vendredi 28 et samedi 29 avril 1905..... 57*

Liste des exposants à l'Exposition annexe du Musée pédagogique 64*
P. Janet. — Sur les tendances et les recherches actuelles de l'Électrotechnique..... 67*
Pierre Weiss. — Les propriétés magnétiques de la pyrrhotine et celles des corps ferromagnétiques en général..... 68*
Maurice Leblanc. — Expériences de M. Cooper Hewitt sur les tubes à vide. 69*
J. de Kowalski. — Les phénomènes qui accompagnent les décharges électriques dans l'air..... 69*

SÉANCE DU 5 MAI 1905..... 70*

Blanc. — Sur la résistance au contact de deux métaux..... 73*
H. Buisson. — Nouvelle détermination de la masse du décimètre cube d'eau pure (méthode de MM. Macé de Lépinay, Benoît et Buisson)..... 74*
Ch.-Ed. Guillaume. — Remarques sur la communication de M. *H. Buisson*. 76*
Le Bel. — Sur l'équilibre thermique..... 76*

SÉANCE DU 19 MAI 1905..... 77*

P. Langevin. — Sur les ions de l'atmosphère..... 79*
Broca et Turchini. — Expériences sur la résistance des fils métalliques pour les courants de haute fréquence..... 81*

SÉANCE DU 2 JUIN 1905..... 82*

A. Dufour et J. Lemoine. — Appareil à inscriptions graphiques..... 83*
Eugène Bloch. — Sur la conductibilité des gaz issus d'une flamme..... 83*
P. Langevin. — Remarques au sujet de la communication de M. *E. Bloch*. 84*
C. de Watteville. — Exposé des expériences de M. Hemsalech sur l'étincelle électrique..... 84*

Pages.

ARMAGNAT. — Interrupteur Wehnelt à circulation. Rupteur Carpentier à palette polarisée pour courant alternatif 86*
Henri ABRAHAM. — Fabrication de fils métalliques très fins 86*

SÉANCE DU 16 JUIN 1905 ..... 87*

A. GUÉBHARD. — Questions d'énergétique photographique 88*
G. LIPPMANN. — Photographies en couleurs du spectre négatives par transmission 88*
COTTON. — Remarques au sujet de la communication de M. *Lippmann* 89*
G. DORLÉANS. — Sur quelques particularités de l'osmose des solutions aqueuses 89*

SÉANCE DU 7 JUILLET 1905 ..... 90*

CASTEX. — Dispositif pour inscription graphique 91*
E. LANGLET. — Méthodes employées au laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers pour l'étude des objectifs photographiques .. 92*
A. BLONDEL. — Sur les phénomènes de l'arc chantant 93*
Ch.-Ed. GUILLAUME. — Les nouvelles méthodes de mesure des bases géodésiques. Recherches de MM. Benoît et Guillaume sur les mesures par fils tendus; matériel de mesure des bases construites avec la coopération de M. Carpentier 94*
Lieutenant-Colonel BOURGEOIS. — Remarques au sujet de la communication de M. *Guillaume* 96*

SÉANCE DU 17 NOVEMBRE 1905 ..... 97*

H. MOULIN. — Sur un terme complémentaire de la pression intérieure dans la formule de Van der Waals 98*
COTTON. — Sur la biréfringence magnétique des liquides hétérogènes 99*
PÉROT. — Compte rendu de la réunion tenue à Oxford pour la coopération dans les recherches sur le Soleil 101*
V. CRÉMIEU. — Recherches sur la gravitation 103*

SÉANCE DU 1er DÉCEMBRE 1905 ..... 103*

Maurice LEBLANC. — Sur une nouvelle machine frigorifique 104*
LE BEL. — Pouvoir émissif et absorbant 105*
Pierre WEISS. — Note sur les propriétés des contacts imparfaits. Travaux de M. Fisch, M. Schneider, M. Blanc 106*

SÉANCE DU 15 DÉCEMBRE 1905 ..... 109*

Georges CLAUDE. — Sur la liquéfaction de l'air et ses applications 110*
TURCHINI. — Sur le rendement en rayons X du tube de Crookes suivant les conditions de son excitation 111*
Liste des Ouvrages reçus pendant l'année 1905 ..... 113*
Liste des membres de la Société 129*
Table des Matières 197*

37647 Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS, quai des Grands-Augustins, 55.

This book should be returned to the Library on or before the last date stamped below.

A fine of five cents a day is incurred by retaining it beyond the specified time.

Please return promptly.